

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAITRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Eng.

PAR
NASRI, Hassan

MESURE DE CONTRAINTES RÉSIDUELLES DUES AU SOUDAGE ET AU
SOUDAGE-MARTELAGE PAR MICRO-PROFIL DE SURFACE

MONTREAL, LE 21 Juin 2007

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Henri Champlaud, directeur du mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jacques Lanteigne, codirecteur
Institut de Recherche d'Hydro-Québec

M. Marc Thomas, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Hakim Bouzid, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 22 Mai 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

MESURE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DUES AU SOUDAGE ET AU SOUDAGE-MARTELAGE PAR MICRO-PROFIL DE SURFACE

Hassan Nasri

SOMMAIRE

Dans le domaine de la fabrication mécanique, différentes méthodes d'assemblage sont employées. De ce fait il devient primordial de connaître les contraintes induites dans ces assemblages afin d'éviter leur effondrement prématuré en service. Différentes méthodes sont utilisées pour mesurer ces contraintes, chacune d'elles ayant ses limites et son degré de fiabilité. Les méthodes de mesures de contraintes résiduelles les plus accessibles ne permettent que des mesures ponctuelles, ce qui est insatisfaisant, d'où la nécessité de mettre en œuvre une méthode de mesure qui permet d'estimer un champ de contrainte sur la totalité d'une surface.

La nouvelle méthode de mesure présentée, qui est très simple d'application et qui donne une distribution complète de contraintes suivant une direction donnée, est la méthode de micro-profil d'une surface de coupe. Elle est basée sur la mesure de la relaxation des contraintes. Cette méthode s'est révélée pratique et précise pour mesurer des contraintes induites lors de la fabrication. La mise en œuvre de cette méthode nécessite en premier lieu une coupe soigneusement effectuée par électroérosion (EDM) de la surface à traiter, puis l'utilisation d'un profilomètre laser servant à la mesure précise des déplacements, ainsi que la manipulation des programmes de traitement de données et de calcul numérique par éléments finis.

Les déplacements en surface sont d'abord mesurés à l'aide de la caméra laser, les données sont ensuite traitées par un programme d'orientation, de filtrage et de lissage. Les déplacements, obtenus après traitement, sont appliqués aux nœuds d'un modèle par éléments finis dont la géométrie est discrétisée par un maillage reconstituant la portion résiduelle de la plaque après coupe et sur laquelle les mesures ont été effectuées. À l'aide d'un code de calcul linéaire élastique par éléments finis, nous solutionnons le modèle, ce qui reconstitue la composante de la contrainte perpendiculaire à la surface de coupe, soit la composante de la contrainte résiduelle qui avait donné lieu au profil de déplacements mesurés par le profilomètre.

Les résultats numériques des contraintes sont confrontés aux contraintes calculées à l'aide de la réponse de jauges de déformations bi-axiales placées en surface de la plaque soudée, lors de la coupe EDM, ainsi qu'à la contrainte estimée par la réponse d'une rosette lors du perçage en son centre (RS200) et finalement à des mesures par rayons X (XRD).

Sur un premier échantillon, les valeurs numériques de contraintes obtenues par la méthode de micro-profil de la surface de coupe et les contraintes estimées à partir de jauges bi-axiales sont comparables et indiquent la même tendance. Cependant, nous observons, contrairement à la méthode du perçage, que la contrainte résiduelle maximale n'est plus dans l'axe de la soudure. Nous avons attribué ce désaxement à un phénomène de plastification produit lors de la découpe de la plaque, en raison de l'absence de bridage de la plaque lors de cette opération. De ce fait, d'autres plaques sont analysées tout en respectant cette dernière condition.

Sur un second échantillon seulement soudé comme le premier, les contraintes calculées en surface, à partir de la méthode du trou de perçage, révèlent que la contrainte maximale se trouve au centre de la plaque sur l'axe du cordon de soudure, montrant également que les contraintes résiduelles sont distribuées symétriquement de part et d'autre de cet axe. Cette répartition de contrainte est également observée par la méthode du micro-profil. Ainsi, les valeurs mesurées dans les trois cas sont comparables et se valident.

Le dernier échantillon, soudé et ensuite martelé, révèle que la méthode de mesure par micro-profil est capable de mesurer des contraintes induites de compression. Celles-ci se valident très bien par les autres méthodes de mesure, ce qui ouvre une porte à l'étude des contraintes dues à un quelconque procédé de traitement de surface induisant de la compression. Cela nous a permis également de faire une analyse sommaire sur l'effet du martelage sur la redistribution des contraintes de tension déjà en présence dues au soudage.

MESURE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DUES AU SOUDAGE ET AU SOUDAGE-MARTELAGE PAR MICRO-PROFIL DE SURFACE

Hassan Nasri

ABSTRACT

In the area of mechanical fabrication, various methods of assembly are employed. It is of utmost importance to know the fabrication induced stresses in order to prevent these assemblies from collapse. Various methods are used to measure these stresses, each with its own limits and degree of reliability. The most accessible methods of measurement of residual stresses are point methods, which is unsatisfactory and points out to the need for establishing a method of measurement allowing the evaluation of the stress distribution on the whole surface.

The new proposed method of measurement is very simple to implement. Known as the micro-profile method, it gives the distribution of the stress component normal to a plane generated by wire cutting. It is based on stress relaxation. This method has proved to be efficient for estimating the residual stresses inherited from fabrication. The implementation of this method simply requires a careful cut carried out by an electric discharge machine (EDM) at the point of interest, a laser profilometer scan of the released displacements, along with program handling for treating data and some finite element basic calculations.

Released displacements at the cut surface are first measured using the laser-camera. Programs are then used for re-orienting the target plane and for data filtering and smoothing. Finally, these displacements are prescribed at some specific nodes of the surface of a finite element model of the cut piece. The linear elastic static module of the finite element code is used to solve the normal stress components at the surface, which represent the residual stresses that were acting on that plane before wire cutting.

The calculated residual stresses were compared with that obtained from various experimental methods, namely from biaxial strain gages installed on the surface of the plate prior to EDM cutting, from the hole-drilling technique (RS200), and finally from by X-Ray measurements (XRD).

Whit the first sample, stresses obtained from the micro-profile method and from biaxial gages are comparable and show the same trend. However, contrary to the hole-drilling method, the maximum residual stress is not in the weld centerline. This offset was attributed to a phenomenon of material plastic yielding that occurred during cutting, because of a lack of restraint of the plate during the cutting operation.

On a second sample, also as welded, stresses obtained from the hole-drilling method and from the XRD method revealed a maximum stress at the plate weld centerline, and a symmetrical stress distribution relative to this axis. This distribution of stresses is also observed by the micro-profile method. A good correlation is then found between the three measurements.

The last sample, which was welded and hammered, showed the ability of the micro-profile method to measure the compression induced hammer-peening operation. Again a good correlation was found between the three measurement techniques. These results are very promising and demonstrate the versatility of the micro-profile method to analyze virtually any surface treatment process. This also allowed introducing the study of the influence of hammer-peening on the reallocation of tensile stress induced by welding.

REMERCIEMENTS

Ce travail de mémoire a été réalisé au laboratoire de Recherche d'hydro Québec. Au terme de ce travail, je tiens à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à son bon déroulement.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à mon directeur de mémoire, le Professeur Henri Champlaud, pour son soutien et sa confiance.

Je remercie également le Dr Jacques Lanteigne, mon codirecteur de recherche qui a dirigé ce travail et pour la grande disponibilité qu'il a manifestée. J'ai beaucoup apprécié ses conseils, ses encouragements et son amitié et pour avoir accepté de veiller sur la qualité de ce travail. Il m'a permis de mener à bien cette étude.

Je tiens également à remercier très vivement l'ensemble des personnes travaillant au laboratoire de l'IREQ, et tout particulièrement Carlo Baillargeon, avec qui j'ai eu un grand plaisir à travailler. Les expérimentations présentées dans ce mémoire n'auraient pu être réalisées sans son aide.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des membres du Jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à cette étude.

Il est possible que j'oublie injustement certaines personnes, c'est pourquoi, pour finir, j'exprime mes remerciements à toutes celles et à tous ceux que j'ai été amené à rencontrer lors de ce travail et qui ont contribué au bon déroulement de celle-ci.

Finalement j'adresse un grand merci à ma conjointe qui a toujours été présente par son soutien.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	v
TABLE DES MATIÈRES.....	vi
Liste des TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE	3
1.1 État des contraintes résiduelles introduites par soudage.....	3
1.2 Mesure des contraintes résiduelles par la méthode de découpe.....	11
1.3 Effets des traitements de surface sur les contraintes internes	21
1.4 Revue des méthodes de mesures usuelles.....	29
1.5 Conclusion et objectifs	31
CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DE MICRO-PROFIL DE SURFACE.....	34
2.1 Méthode de coupe	35
2.2 Découpe des plaques	37
2.3 Méthode de mesure du profil des déplacements résultants	38
2.4 Méthode de traitement des données avant calcul	40
2.4.1 Filtrage des valeurs.....	40
2.4.2 Lissage et fonction d'approximation.....	42
2.4.3 Calcul numérique des contraintes.....	47
CHAPITRE 3 VALIDATION DE LA MÉTHODE DE MICRO-PROFIL SUR UNE PLAQUE SOUDÉE	50
3.1 Préparation des échantillons.....	50
3.2 Paramètres de soudage	51
3.3 Mesure des contraintes sur la première plaque.....	53
3.3.1 Mesure des contraintes par la méthode des jauges bi-axiales	54

3.3.2	Mesure des contraintes par la méthode du RS200.....	58
3.4	Mesure des contraintes dans la seconde plaque.....	62
3.4.1	Mesure des contraintes par la méthode du RS200.....	62
3.4.2	Mesure des contraintes par la méthode XRD	64
3.5	Méthode du micro-profil et comparaison avec les autres méthodes de mesure	66
3.5.1	Analyse de contraintes pour la plaque 1.....	66
3.5.2	Analyse des contraintes pour la plaque 2	69
CHAPITRE 4	ÉVALUATION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DUES AU MARTELAGE SUR UNE PRÉPARATION SOUDÉE	72
4.1	Paramètres du martelage	72
4.2	Mesure des contraintes dans la plaque martelée.....	74
4.2.1	Mesure des contraintes par la méthode RS200.....	75
4.2.2	Mesure des contraintes par la méthode XRD	77
4.3	Méthode du micro-profil et comparaison avec les autres méthodes de mesure pour la plaque martelée	78
CONCLUSION	87
RECOMMANDATIONS	89
ANNEXE I	SOURCE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES RELATIVES AU SOUDAGE.....	90
ANNEXE II	APPROXIMATION D'UN PROFIL PAR LA METHODE DES MOINDRES CARRÉES	93
ANNEXE III	PROGRAMME DE RÉOLUTION PAR MEF SUR ANSYS	102
BIBLIOGRAPHIE	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	Valeurs de la température sur les différentes plaques (aciers inoxydables) aux positions indiquées en fonction du numéro de la passe 10
Tableau II	Méthodes de mesure usuelles 29
Tableau III	Sommaire des méthodes de mesure et leurs attributs 31
Tableau IV	Paramètre de soudage 52
Tableau V	Paramètre de martelage 74
Tableau VI	Résultats des mesures des déformations et valeurs des contraintes 56
Tableau VII	Valeurs des contraintes obtenues par perçage 62
Tableau VIII	Valeurs calculées des contraintes par RS200 sur la plaque 2 64
Tableau IX	Valeurs des contraintes longitudinales et transversales en fonction de la profondeur 65
Tableau X	Valeurs des contraintes résiduelles obtenues par RS200 sur la plaque 3 77
Tableau XI	Contraintes résiduelles obtenues par mesures XRD sur la plaque 3 ... 77

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Dimension des spécimens pour la mesure de la contrainte.....	4
Figure 2	Variation de la contrainte résiduelle longitudinale à travers la soudure à mi-épaisseur.	5
Figure 3	Configuration des plaques soudées. (a) Épaisseur 49 mm (comme soudée). (b) Épaisseur 45 mm (plaque épaisse). (c) Épaisseur 13 mm (plaque mince).	6
Figure 4	Distribution des contraintes résiduelles sur les sections B-B et C-C sur la plaque soudée.	7
Figure 5	Dimensions et détails des plaques soudées.	8
Figure 6	Distribution de la température à travers la plaque soudée.	9
Figure 7	Contraintes résiduelles mesurées sur les plaques soudées de 6,8	10
Figure 8	Méthode de découpe d'éléments.....	12
Figure 9	Principe de superposition de contraintes.....	13
Figure 10	Tractions équivalentes lors de la relaxation sur les surfaces de coupe.	15
Figure 11	Champ de contraintes résiduelles obtenu par la méthode de micro-profil et celle de diffraction de neutrons.	16
Figure 12	Échantillon utilisé lors du soudage et la mesure des contraintes par micro-profil de surface.....	17
Figure 13	Champ de contraintes résiduelles longitudinales obtenu par la méthode de micro-profil.	18
Figure 14	Valeurs des contraintes résiduelles le long de la surface à diverses profondeurs.	19
Figure 15	Comparaison des valeurs obtenues par micro-profil et diffraction de neutrons à 2 mm de profondeur.	20
Figure 16	Dimensions de l'échantillon avec zone de martelage laser.	22
Figure 17	Champ de contrainte résiduelle mesuré par micro-profil : (a) avant martelage laser, (b) Après martelage.	23

Figure 18	Valeurs de la contrainte résiduelle avant et après martelage : (a) Au centre du cordon. (b) À la frontière de la soudure (à 9 mm du centre). (c) En dehors du cordon (à 30 mm du centre).....	24
Figure 19	État de contrainte généré par grenaillage.....	26
Figure 20	Mesures des contraintes résiduelles : a) Linges de mesure,(b) Évaluation de la contrainte résiduelle avant et après grenaillage sur A-B.	27
Figure 21	Contraintes résiduelles longitudinales en profondeur sur les lignes B-C et D-E.	28
Figure 22	Principe de relaxation des contraintes résiduelles.....	35
Figure 23	Méthode de coupe à l'EDM.....	36
Figure 24	Ligne de coupe EDM sur la plaque soudée.....	37
Figure 25	Caméra laser pour la mesure par balayage.....	38
Figure 26	Contour limite de la surface de mesure.....	39
Figure 27	Résultat du filtrage des données brutes tracé sur une ligne.....	42
Figure 28	Variation de la variance σ_n^2 en fonction du degré du polynôme.	44
Figure 29	Écart moyen en fonction du degré du polynôme.	45
Figure 30	Résultat sur une ligne du lissage pour une surface analysée.....	46
Figure 31	Modèle pour le calcul numérique.....	47
Figure 32	Modèle géométrique avec conditions frontières	48
Figure 33	Préparation avant soudage de la plaque en acier A516.....	51
Figure 34	Dépôt de soudure sur les plaques avec préparation initiale.	53
Figure 35	Plaque en acier 516 soudée avec jauges de déformation.	54
Figure 36	Contraintes expérimentales obtenues par jauges sur la plaque 1.	57
Figure 37	Emplacement des jauges du RS200 sur la plaque 1.....	58

Figure 39	Contraintes principales mesurées en fonction de la profondeur par la méthode RS200.....	60
Figure 40	Valeurs calculées des contraintes en fonction de la profondeur de perçage.	61
Figure 41	Position des jauges pour les mesures du RS200 sur la plaque 2.	63
Figure 42	Équipement utilisé pour la mesure XRD.	65
Figure 43	Profil des contraintes résiduelles σ_z sur la plaque 1.....	66
Figure 44	Valeurs de la contrainte résiduelle longitudinale en surface sur la plaque 1	67
Figure 45	Profil des contraintes résiduelles sur la plaque 2.	69
Figure 46	Valeurs de la contrainte résiduelle sur la plaque 2.....	70
Figure 47	Robot «Scompi» utilisée pour le martelage	73
Figure 48	Configuration du martelage sur la plaque 3.	75
Figure 49	Position des mesures des contraintes au RS200 sur la plaque 3.	76
Figure 50	Profil des contraintes résiduelles sur la plaque 3.	78
Figure 51	Valeurs de la contrainte résiduelle sur la plaque 3.....	80
Figure 52	Valeur de la contrainte en profondeur sur les échantillons soudés et soudés martelés.	81
Figure 53	Valeurs de la contrainte résiduelle à travers la profondeur de la pièce avant et après martelage en différentes positions.....	84
Figure 54	Zone affectée thermiquement d'un cordon de soudure.....	91

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

$a_{i,j}$	Coefficients du polynôme d'approximation
ASTM	American Society for Testing and Materials
CMM	Coordinate Measuring Machine
E	Module d'élasticité
E_n	Résidu dans la logique des moindres carrées
EDM	Electro-Discharge Machining (Coupe par électroérosion)
MEF	Méthode des éléments finis
N_x	vecteur unitaire normale à la surface
$P_i(x,y)$	Séries polynomiales, polynôme de Lagrange
S_Y	Contrainte d'écoulement du matériau
$S_{1,2,3}$	Contrainte suivant les direction 1,2 ou 3
$S_{max,min}$	Contrainte principale
T_n	Traction équivalente
UX	Déplacement mesuré suivant l'axe des x
$\sigma_{x,y,z}$	Contrainte résiduelle perpendiculaire à la direction longitudinale d'une soudure
σ_n^2	Variance
σ_i	Contrainte mesurée selon l'axe i
τ_{ij}	Cisaillement dans le plan $i-j$
ν	Coefficient de Poisson
ψ	Angle incident
λ	Longueur d'onde du rayon incident

INTRODUCTION

Les contraintes résiduelles influent considérablement sur la tenue en fatigue des systèmes mécaniques. En effet, les procédés de fabrication des pièces mécaniques, tels le laminage, l'usinage, le soudage, les traitements de surface ou le traitement thermique mettent en jeu des phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques qui ne sont pas sans conséquences sur les propriétés des pièces et leur tenue en service. L'amélioration de cette dernière nécessite la maîtrise et l'optimisation des paramètres des procédés de fabrication.

Dans le but d'améliorer la conception des pièces et d'optimiser leur fabrication, les contraintes résiduelles, induites lors de la fabrication par soudage ou par soudage martelage, doivent être quantifiées à l'aide de mesures expérimentales. En l'occurrence, une meilleure connaissance de l'historique complet du procédé de fabrication servira à suivre l'évolution de ces contraintes et à diagnostiquer plus précisément la durée de vie des assemblages soudés. Les analyses des résultats expérimentaux sont également à la base de discussions scientifiques et sont indispensables au développement et à la validation des modélisations numériques.

La méthode de micro-profil d'une surface de coupe, faisant l'objet de cette recherche, est une nouvelle procédure de mesure de contraintes résiduelles. Elle permet d'obtenir le champ de contraintes résiduelles sur la totalité d'une surface de coupe. Nous présentons ici un protocole complet de mesure et d'interprétation de cette méthode qui donne la composante normale de la contrainte en tout point de la surface de coupe.

Le protocole de mesure comprend la coupe par électroérosion, la mesure du micro-profil au laser, le traitement des données et le calcul des contraintes par éléments finis. Ce protocole sera appliqué sur une préparation soudée et une autre soudée puis martelée sur des plaques d'acier carbone A516. Sur l'ensemble des échantillons, le soudage est exécuté avec les mêmes paramètres comme le voltage, la vitesse de déplacement ou le débit du métal d'apport. La connaissance de ces champs de contraintes permettra également d'étudier

l'effet, bénéfique ou non, d'un traitement de surface comme le martelage sur la distribution des contraintes résiduelles déjà en présence.

Ce mémoire décrit en premier lieu les sources possibles des contraintes résiduelles et les mesures de ces dernières par les méthodes usuelles et ponctuelles comme les jauges, la méthode du trou ou au rayon x. La seconde partie traite quant à elle de l'application de la méthode de micro-profil, qui fait intervenir la méthode des éléments finis pour le calcul des contraintes, ainsi que l'analyse des résultats des contraintes en présence dans le cas de contraintes résiduelles induites par le soudage et surtout l'effet du martelage sur ces contraintes déjà en présence. En effet, le martelage qui est appliqué sur le cordon de soudure permet de changer complètement la distribution des contraintes internes en induisant de la compression d'où l'intérêt de mesurer l'amplitude de ces contraintes résiduelles après ce traitement de surface. Pour valider les mesures faites au micro-profil, des mesures de RS-200 et XRD seront réalisées pour comparer entre elles ces méthodes de mesures.

Cette étude, se basant sur des résultats expérimentaux, permettra d'ouvrir le chemin vers des améliorations sur la conception et les traitements de surface dans le but d'amélioration des assemblages soudés. En effet la présente recherche trouve son application pratique dans les différents projets où les contraintes résiduelles introduites, par un quelconque mode de fabrication dans les assemblages, ont un effet significatif sur leur tenue en service.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTERATURE

Le soudage est une méthode d'assemblage qui entraîne généralement la création d'un champ de contraintes résiduelles autour du cordon de soudage. L'importance de ce champ résiduel change selon les paramètres de soudage, le type de matériau et également les efforts externes appliqués sur l'assemblage. Ces contraintes internes peuvent atteindre et excéder la contrainte élastique. Les contraintes résiduelles de tension sont en outre les plus dommageables du fait qu'elles peuvent réduire la vie en fatigue tandis que celles en compression auront plus souvent un effet contraire. La revue de littérature qui suit traite de la configuration de ces contraintes résiduelles, c'est-à-dire de leur répartition autour du cordon de soudage, de l'effet de certaines méthodes de traitement de surface qui agiraient sur la redistribution de ces contraintes et des méthodes de mesures. Ce chapitre se termine par une section traitant des objectifs de ce mémoire telle l'application de la méthode de micro-profil pour l'évaluation de ces contraintes.

1.1 État des contraintes résiduelles introduites par soudage

Il est important de rappeler quel rôle important joue la taille de la zone de fusion et la taille de la zone affectée thermiquement (ZAT) dans les assemblages soudés. Ces zones contiennent les défauts qui constituent le point de départ de tout problème dans les joints soudés (voir annexe 1).

Dans leur étude sur l'effet du soudage sur la génération de contraintes résiduelles internes, Carr et al [1] procèdent à la mesure de la distribution macroscopique des contraintes à travers une soudure de l'alliage Zircaloy-4 par le procédé TIG (Tungsten Inert Gas). Ils démontrent que pour une géométrie linéaire comme dans le cas des plaques soudées, le procédé de soudage produit habituellement des contraintes résiduelles de tension élevées le long de la direction de la soudure, les valeurs maximales se trouvent dans le métal de la soudure et dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Le gradient thermique entre le

métal fondu et la partie froide produit une déformation plastique ainsi qu'une contrainte macroscopique qui lui est associée.

L'expérience consiste à joindre bout à bout par soudage deux plaques épaisses de 8,6 millimètres de Zircaloy-4 laminées à chaud et recuites, dont les dimensions sont de 600x90 mm² à l'aide d'une protection gazeuse d'Argon.

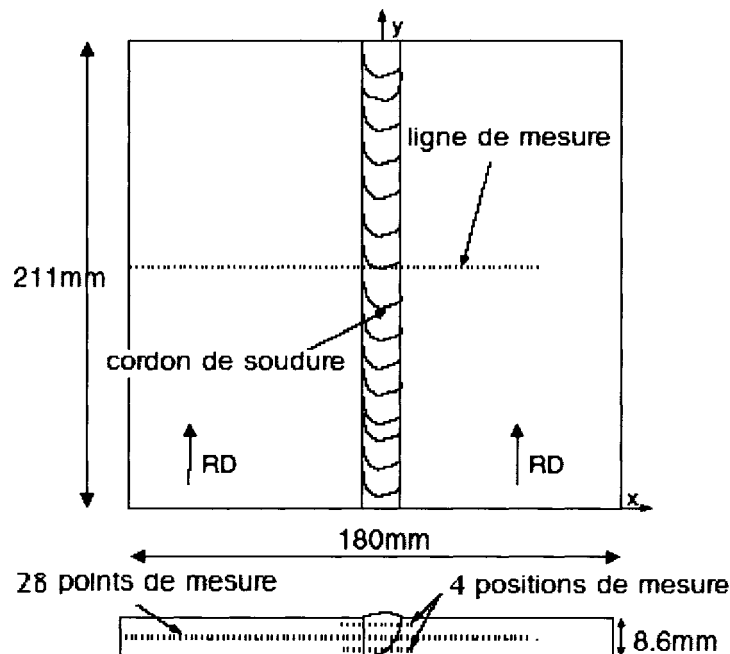


Figure 1 *Dimension des spécimens pour la mesure de la contrainte.*
(Adapté de Carr et al [1])

Un segment de 200 millimètres de long (figure 1) a été coupé de la soudure originale afin de mesurer les contraintes internes par le biais de la méthode de diffraction neutronique. La diffraction neutronique permet une pénétration profonde dans la plupart des matériaux et permet ainsi de mesurer des contraintes résiduelles en profondeur dans les soudures d'une manière non destructive. Ces mesures ont révélées que les moyennes des contraintes longitudinales (le long du cordon de soudure) étaient pour l'application considérée de 220 MPa dans la soudure comme le montre la figure 2, avec une variation linéaire d'environ 40 MPa à travers la largeur de la plaque.

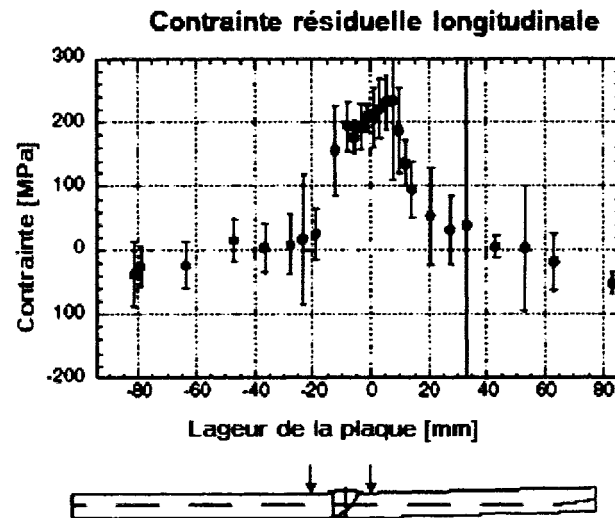


Figure 2 Variation de la contrainte résiduelle longitudinale à travers la soudure à mi-épaisseur. (Adapté de Car et al [1])

Un schéma de la géométrie de la soudure est montré au bas de cette figure 2 où les flèches délimitent l'endroit à l'intérieur duquel la texture reste inchangée par le soudage. Elle correspondant également à la zone où les contraintes sont maximales. Le trait interrompu à mi-épaisseur de la plaque indique la position des mesures.

Une autre étude, celle-là de l'Arai et al [2], montre l'effet des contraintes résiduelles sur la propagation de fissure, les mesures de ces contraintes ayant été faites au préalable. En effet, des mesures de contraintes résiduelles obtenues par une méthode acousto-élastique sont faites sur des spécimens soudés de plaques. La figure 3(a) montre la configuration des plaques soudées. Les figures 3(b) et 3(c) montrent deux échantillons prélevés à partir de la plaque de la figure 3(a) ayant subies un traitement thermique.

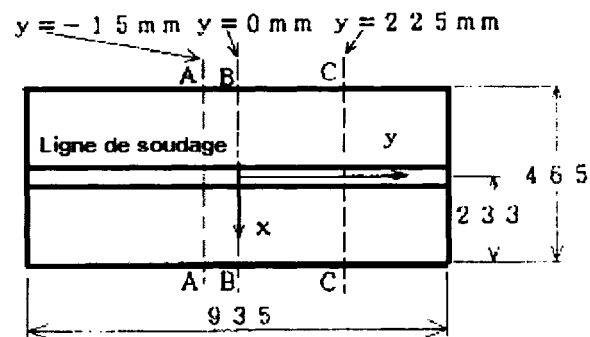


Fig. 3 (a)

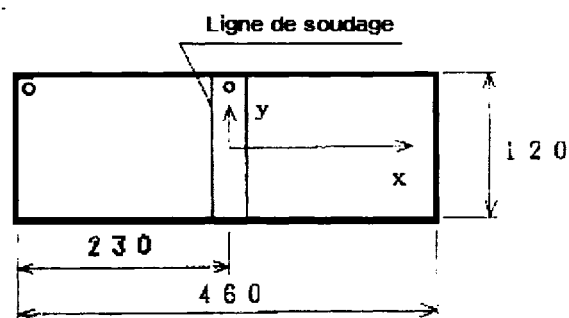


Fig. 3 (b)

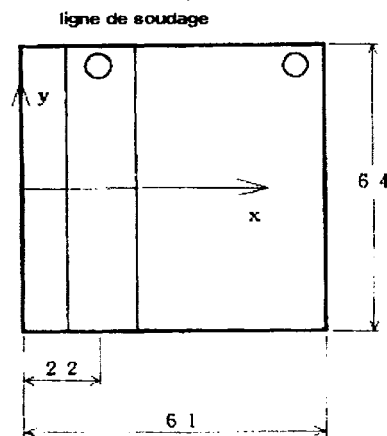


Fig. 3 (c)

Figure 3 Configuration des plaques soudées. (a) Épaisseur 49 mm (comme soudée).
 (b) Épaisseur 45 mm (plaque épaisse). (c) Épaisseur 13 mm (plaque mince).
 (Adapté de Arai et al [2])

Les résultats des mesures des contraintes résiduelles sont montrés à la figure 4. De toute évidence cela montre que la valeur maximale des contraintes résiduelles, pour la plaque de la figure 3(b), se trouve au centre de la plaque et que cette contrainte est en tension et elle

est maximale comme prévu. Les valeurs aux extrémités sont par contre en compression et ne sont pas nécessairement nulles aux bords ; cela étant conditionné par les dimensions de la plaque et l'énergie de soudage.

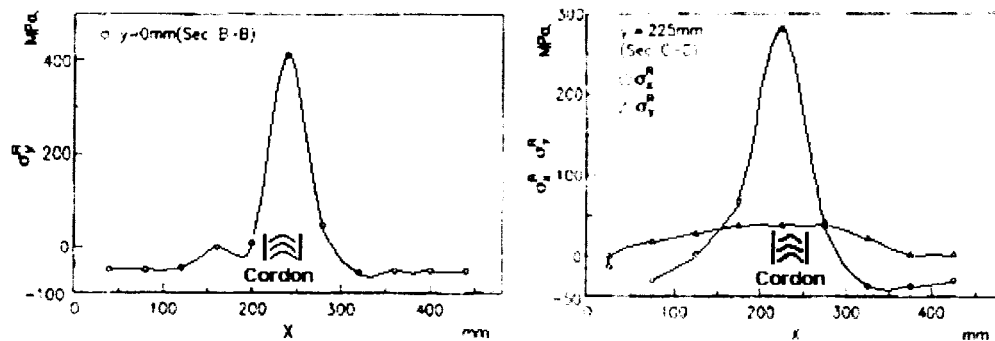


Figure 4 *Distribution des contraintes résiduelles sur les sections B-B et C-C sur la plaque soudée.* (Adapté de Arai et al [2])

Cependant, dans une opération à multi-passes de soudage, le nombre de cycles thermiques que subit les plaques correspond au nombre de passes, et après chacune le champ de contraintes résiduelles change. La mesure des contraintes internes dans les régions touchées par la soudure, après chaque passe de soudage, sera utile afin de comprendre l'évolution des contraintes résiduelles, ce qui permettra l'optimisation de ce procédé d'assemblage.

Murugan et al [3] ont réalisé un travail qui vise à mesurer l'état de contraintes en soudage multi-passes. Des plaques de dimension de 150x140 mm et d'épaisseur de 6, 8 et 12 mm avec une préparation en V ont été jointes par soudage donnant un échantillon final de 282.5 x 150 mm. Les détails de ces préparations sont représentés à la figure 5. L'expérience a été effectuée sur des plaques d'acier inoxydable de type 304 et d'acier à basse teneur en carbone d'épaisseur 6, 8 et 12 millimètres. Les contraintes transversales, c'est à dire les contraintes agissant dans la direction perpendiculaire à la soudure, sont mesurées sur les surfaces de dessus et à la base des plaques soudées par la méthode de diffraction des rayons X après

chaque passe de la soudure. Les passes de soudage sont effectuées successivement en laissant à chacune d'elles le temps de se refroidir à la température ambiante avant d'entamer la suivante.

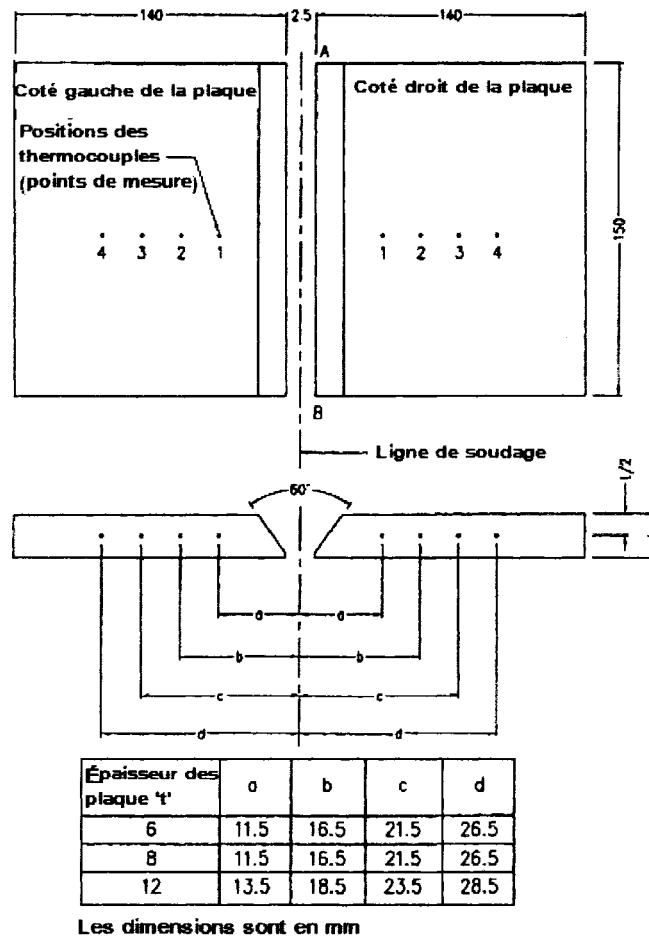


Figure 5 Dimensions et détails des plaques soudées.
(Adapté de Murugan et al [3])

Les cycles thermiques mesurés sur la plaque de gauche pendant la deuxième passe, sur l'une des plaques de 12 millimètres en acier inoxydable, sont indiqués à la figure 6. Ces mesures ont pour objet de montrer la distribution dynamique de la température et le gradient thermique qui s'installe lors du soudage.

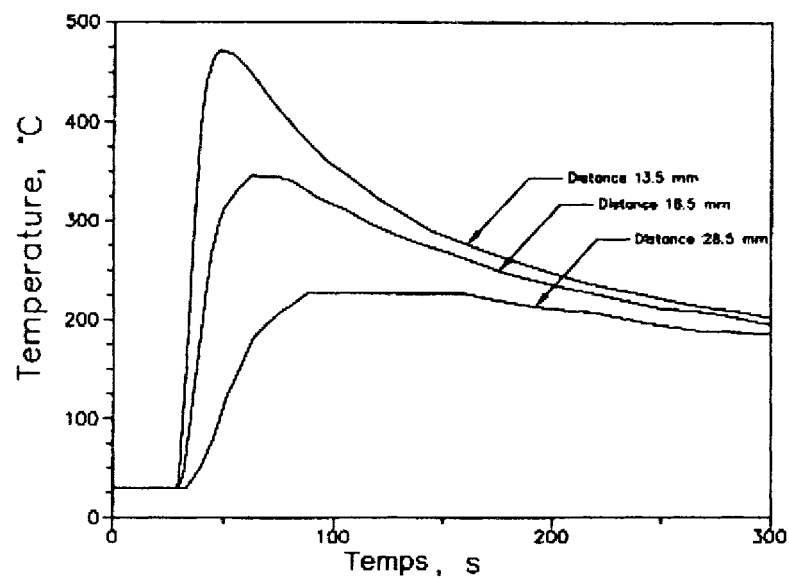


Figure 6 *Distribution de la température à travers la plaque soudée.*
(Adapté de Murugan et al [3])

Les températures maximales atteintes pendant les différentes passes de soudage ainsi que le nombre de ces dernières sont illustrées au tableau I pour les trois échantillons en acier inoxydable soudés.

Tableau I

Valeurs de la température sur les différentes plaques (aciers inoxydables) aux positions indiquées en fonction du numéro de la passe
(Adapté de Murugan et al [3])

Température max [°C]													
Épaisseur des plaques (nominale) [mm]	N° de la passe de soudage	Points mesurés											
		Plaque coté gauche				Plaque coté droit				Valeur moyenne			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
6	1	472	309	250	226	494	335	260	240	483	322	255	233
	2	840	625	474	362	717	558	435	362	779	592	455	362
8	1	532	393	318	280	554	393	305	256	543	393	312	268
	2	645	476	360	315	626	449	340	295	636	463	350	305
	3	717	558	434	368	696	526	410	345	707	542	422	357
12	1	364	252	195	169	400	280	225	188	382	266	210	179
	2	472	347	275	226	508	368	290	250	490	358	283	238
	3	550	406	310	254	583	293	230	201	-	-	-	-
	4	404	320	266	226	534	391	310	266	-	-	-	-

Des mesures des contraintes résiduelles sont effectuées par XRD (diffraction des rayons X) aux points indiqués à la figure 5 sur les plaques soudées après que chacune des passes de soudage ait été effectuée. Ces points se situent à diverses distances de la ligne centrale de soudage.

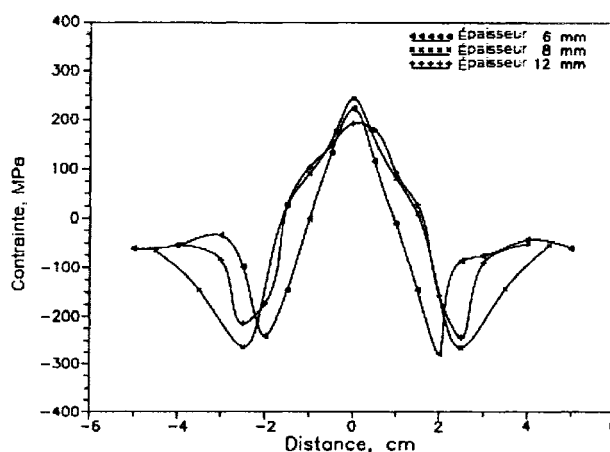


Figure 7 Contraintes résiduelles mesurées sur les plaques soudées de 6,8 et 12 mm (après la dernière passe). (Adapté de Murugan et al [3])

On peut voir à la figure 7, que les valeurs des contraintes résiduelles dans les plaques 6 et 8 d'acier inoxydable sont maximales au centre et sont voisines les unes des autres tandis que dans la plaque soudée de 12 mm la valeur est légèrement plus faible.

La différence entre la valeur maximale de la contrainte résiduelle mesurée sur les deux premiers échantillons et celui ayant une épaisseur de 12 mm est due, selon les auteurs, à l'épaisseur de la plaque et au nombre de passes dans chacun de ces cas. Cette constatation nous incite à considérer l'épaisseur et le nombre de passes sur l'état final des contraintes résiduelles.

Les résultats de ces études sont importants. Ils nous renseignent sur l'état des contraintes dans les assemblages soudés, c'est-à-dire celles induites par ce procédé qui font l'objet de beaucoup d'intérêt afin de les quantifier et de définir leur répartition.

1.2 Mesure des contraintes résiduelles par la méthode de découpe

La méthode de découpe a été introduite par Ueda et al [4], son principe consiste à évaluer des contraintes résiduelles à partir de déformations (aussi appelées déformations inhérentes). Cette méthode de découpe est reprise et raffinée plus tard par Hill et al [5] qui l'utilise sur une application de joint soudé et qui se résume de la façon suivante : un échantillon est découpé successivement en plusieurs morceaux qui sont découpés à leur tour (chacun des morceaux coupés représentant un élément du modèle d'éléments finis) et les déformations résultantes sont mesurées à l'aide de jauges qui sont placées sur chaque morceau avant sa découpe.

La caractéristique distinctive de cette classe de procédures est que les contraintes résiduelles sont déterminées par l'évaluation des sources de ces contraintes dans la pièce. Les spécialistes en mécanique et élasticité des milieux continus, y compris Timoshenko et al [6] et Mura, avancent que la contrainte résiduelle est le résultat d'un certain champ non élastique de déformations qui ne satisfait pas la compatibilité. Ce champ de contrainte est présent dû aux processus mécaniques et thermiques que le corps a subis. Pour un joint

soudé, le champ des micros déformations est la combinaison des transformations de phases et des déformations plastiques qui sont le résultat du procédé de soudure.

Lorsque le profil total des déformations est mesuré, il est utilisé pour l'évaluation des contraintes résiduelles dues à ce champ de déformation comme illustré à la figure 8. L'inconvénient majeur de la méthode présentée par Ueda est que le nombre de jauges utilisées ainsi que le temps d'instrumentation et de coupe est considérable.

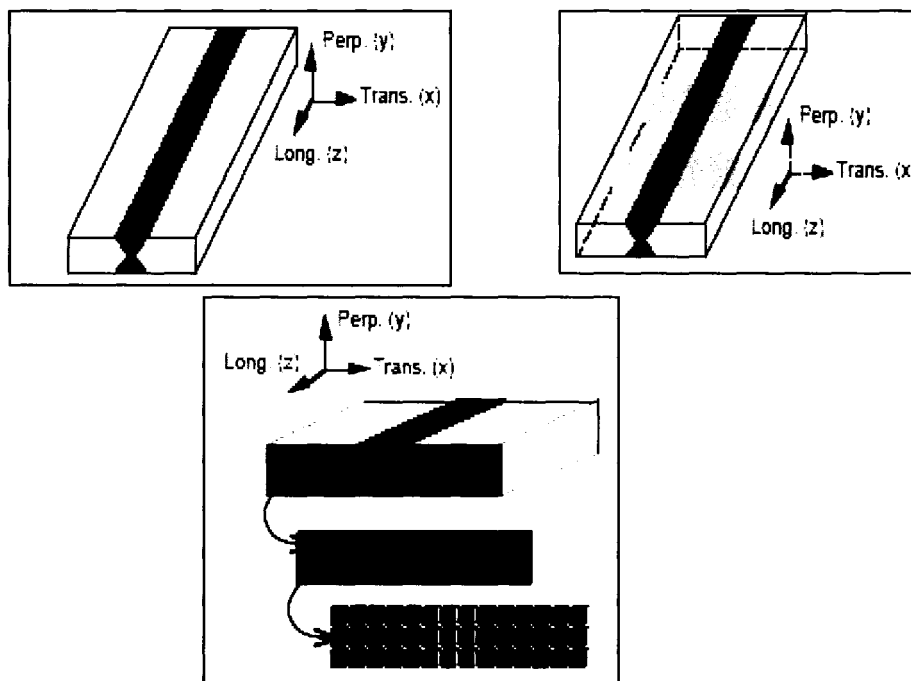


Figure 8 *Méthode de découpe d'éléments.* (Adapté de Hill et al [5])

Une nouvelle méthode pour la mesure des contraintes résiduelles, se basant sur la méthode de découpe de Ueda est présentée par Prime et al [7] et [8]. Il s'agit de couper une pièce contenant des contraintes résiduelles et de mesurer le profil des déplacements dus à la relaxation des contraintes sur les nouvelles surfaces créées. Ensuite, en utilisant un modèle d'éléments finis, on solutionne les contraintes produites par l'imposition des déplacements obtenus lors de la découpe de la pièce : l'opposé des valeurs mesurées est appliqué à la surface du modèle numérique comme conditions frontières de déplacement et le calcul

donne les contraintes résiduelles normales au plan de la coupe. Cette méthode est plus puissante que les autres méthodes de relaxation parce qu'elle permet de déterminer un champ de contraintes résiduelles selon une quelconque direction donnée par la normale au plan de coupe.

La méthode de micro-profil, utilisée pour mesurer des contraintes résiduelles, est basée sur une variation du principe de la superposition de Bueckner [9]. La figure 9 présente une illustration en 2-D pour la simplicité, bien que le principe s'applique également en trois dimensions. En A, on commence par la partie comprenant les contraintes résiduelles à déterminer. En B, la pièce a été coupée en deux et se retrouve ainsi déformée en raison des efforts internes libérés par la coupe.

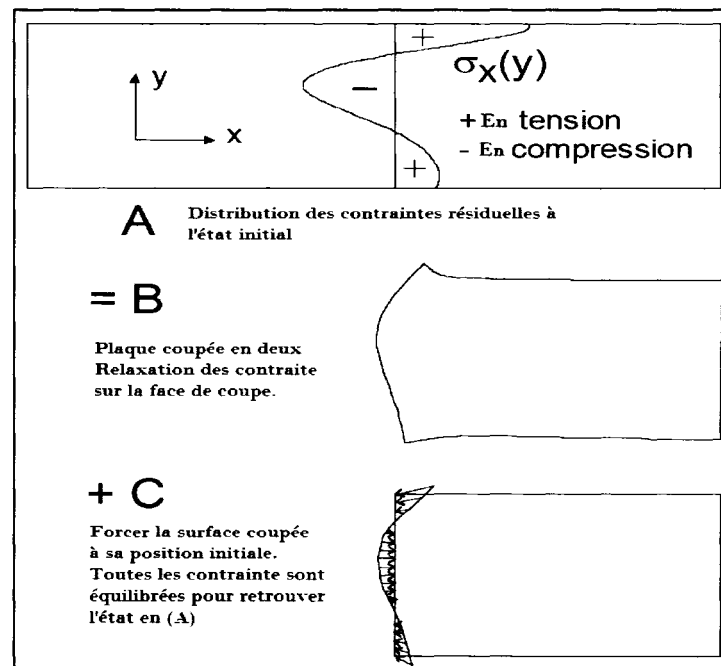


Figure 9 Principe de superposition de contraintes.
(Adapté de Prime [7])

En C, la surface libre créée par la coupe est contrainte de nouveau à sa forme originale. La superposition, de l'état déformé en B et des efforts de relâchement en C, recrée les contraintes résiduelles de la pièce originale en A.

Ce principe de superposition suppose que le matériel se déforme dans le domaine élastique pendant la relaxation et que le procédé de découpe n'introduit pas de contraintes supplémentaires et enfin que les déplacements qui se produisent ne devraient pas être importants (petites déformations).

Selon le théorème de Kirchhoff, la solution pour l'état de contrainte dans le corps élastique est unique. Par ailleurs, l'application du principe de la superposition de Bueckner nous confirme que seules les composantes de contraintes σ_x , τ_{xy} , et de τ_{xz} peuvent être relaxées selon la direction normale à la surface de la coupe. Ce principe nous indique également que la présence des autres contraintes dans le corps (c'est-à-dire σ_y , σ_z et τ_{yz}) n'altèrent pas les déformations relaxées lors de la coupe.

Une limitation importante de la méthode de découpe restreint l'analyse à la mesure des seules contraintes normales et non celles de cisaillement : la mesure des déplacements extérieurs fournit seulement des informations dans la direction normale, excluant celles dans le plan de coupe. Par conséquent, l'approximation analytique de l'étape C de la figure 9 ramènera la surface de nouveau à sa configuration originale dans la direction normale seulement, laissant les déplacements en plan non contraints.

Dans le cas général où les efforts de cisaillement sont présents sur la surface de coupe, une moyenne des déplacements mesurés sur les deux moitiés de la pièce est nécessaire pour déterminer correctement l'effort normal σ_x . Pour expliquer ceci théoriquement, rappelons que les déformations provoquées par la relaxation des contraintes résiduelles peuvent être évaluées en considérant une traction extérieure équivalente sur la surface de coupe. Pour une surface de coupe avec une normale dans la direction x seulement, la traction extérieure équivalente par unité de largeur T est donnée par :

$$T_x = -\sigma_x \cdot n_x \quad (1.1)$$

Et

$$T_y = -\tau_{xy} \cdot n_x \quad (1.2)$$

On a aussi

$$T_z = -\tau_{xz} \cdot n_x \quad (1.3)$$

Où « n » est le vecteur unitaire normal à la surface, soit n_x dans ce cas-ci (dans les équations 1.1 et 1.2). La figure 10 indique que la traction normale T_x est symétrique en ce qui concerne les deux surfaces de coupe tandis que la traction transversale T_y est antisymétrique. Par conséquent, la moyenne des déplacements, sur les deux surfaces, se traduit par le fait que seules les contraintes normales sont présentes.

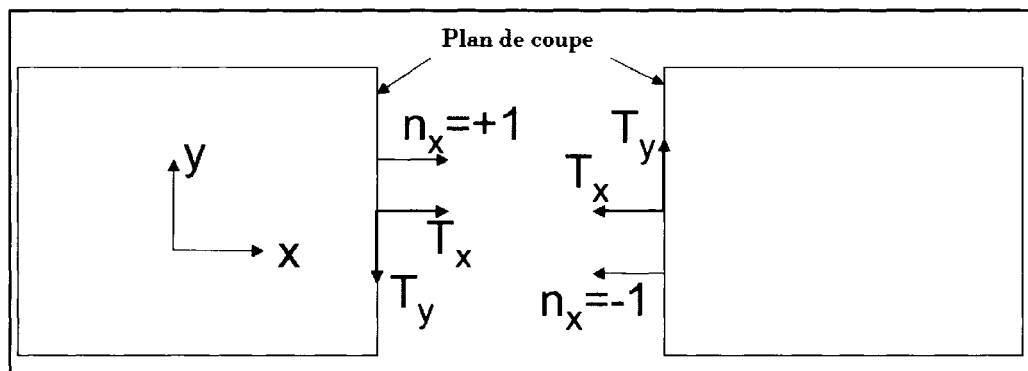


Figure 10 *Tractions équivalentes lors de la relaxation sur les surfaces de coupe. (Adapté de Prime et al [7])*

Pour la validation de la méthode de micro-profil, une plaque en acier BS 4360, généralement employé en structure "offshore" et de dimension 1000x150x12.5 mm, dont la contrainte d'écoulement est de 355 MPa, est utilisée. Une cannelure en U de 8-millimètre de largeur a été usinée à une profondeur de 8,5 millimètres au milieu de cette plaque sur toute la longueur des 1000 millimètres. Une soudure de 12 passes TIG a été faite dans la cannelure en utilisant un fil de Bostrand MS65 utilisé pour les aciers alliés doux et à bas pouvoir de soudage. La plaque a été maintenue pour les 10 premières passes mais laissée libre pour les deux dernières.

En raison des variations des conditions de soudage et du bridage pendant la soudure, on ne s'attend pas à ce que les contraintes résiduelles, près des extrémités transversales, soient nécessairement près de zéro ni qu'elles soient symétriques par rapport au cordon de

soudage. Plusieurs échantillons de 200 mm de long ont été coupés dans la région centrale de la plaque, deux de ces échantillons serviront à la mesure des contraintes résiduelles par la méthode de micro-profil et la méthode de diffraction de neutrons.

La figure 11 montre les cartes en coupe des contraintes résiduelles longitudinales mesurées par les méthodes de micro-profil et de diffraction de neutrons.

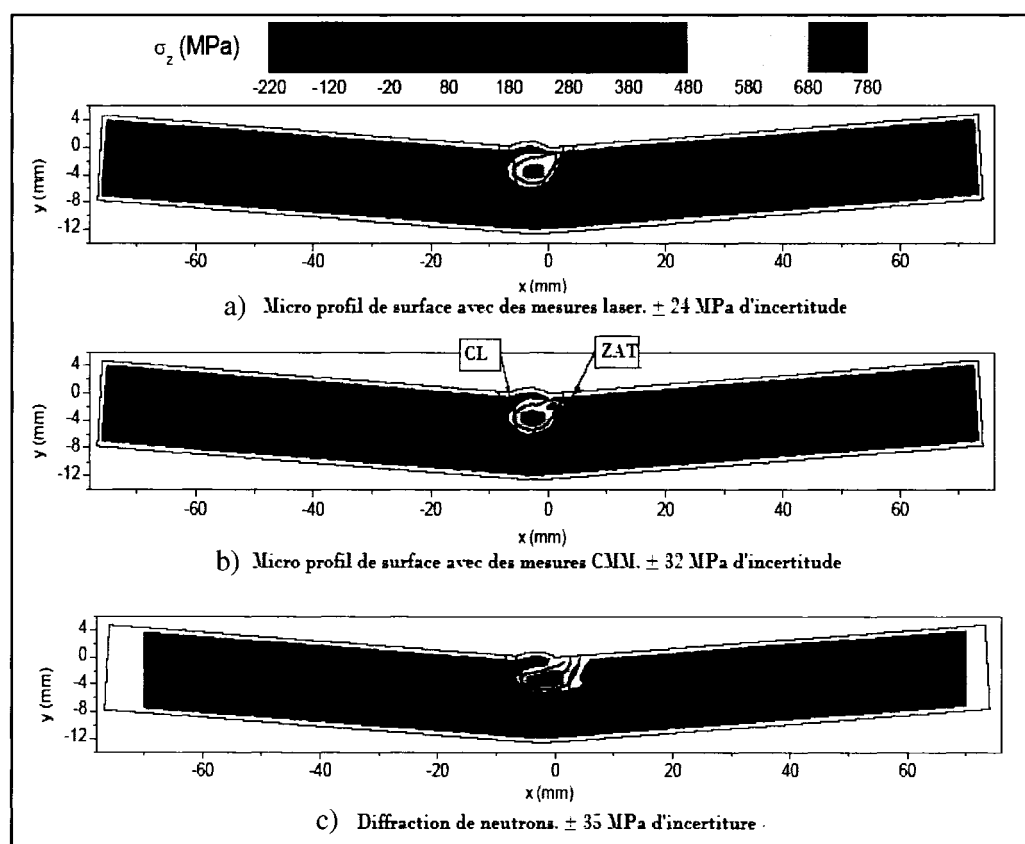


Figure 11 *Champ de contraintes résiduelles obtenu par la méthode de micro-profil et celle de diffraction de neutrons. (Adapté de Prime et al [8])*

La contrainte de tension maximale est d'environ 740 MPa et se trouve au centre de la soudure. Elle excède la limite élastique et cela quelque soit la méthode de mesure, ce qui indique que le résultat sur ce spécimen est indépendant de la méthode expérimentale employée pour mesurer la contrainte en surface et confirme que la méthode de micro-profil est valide. D'ailleurs, il n'y a aucune méthode de mesure permettant d'évaluer les

contraintes dans le domaine plastique (à cause de l'historique des déformations) ce qui implique que la limite élastique est d'au moins de 740 MPa.

La concordance entre la mesure par la méthode de découpe et de diffraction des neutrons est également très bonne sur la totalité de la surface. Les écarts sont dans les limites prévues, selon les évaluations d'incertitude, faisant de la méthode de diffraction des neutrons une validation concluante de la méthode de micro-profil. Les contraintes maximales se produisent sous la surface et excèdent la limite d'élasticité en grande partie à cause de la forte tri-axialité des contraintes qui règne dans cette région du matériau.

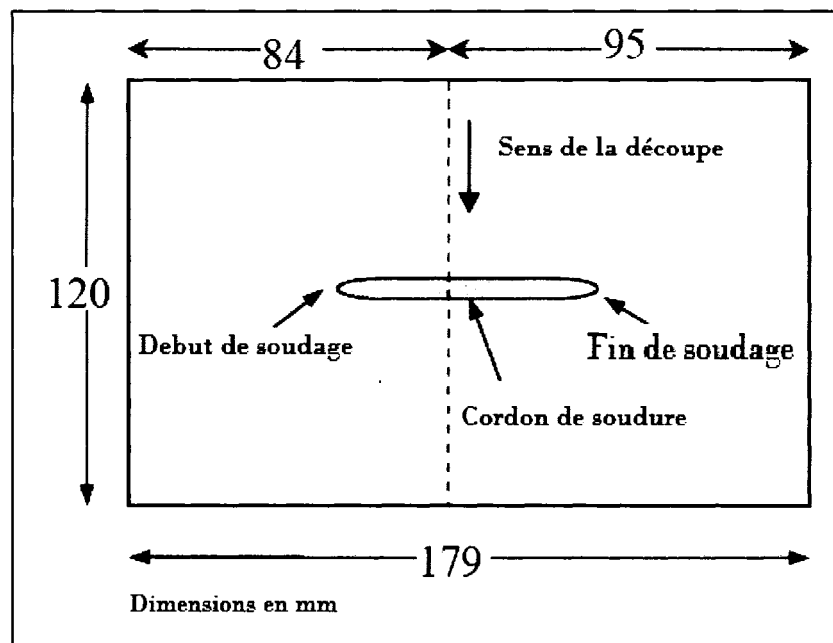


Figure 12 *Échantillon utilisé lors du soudage et la mesure des contraintes par micro-profil de surface. (Adapté de Zhang. et al [10])*

En se basant sur la méthode de micro-profil de Prime et al, le travail de Zhang et al [10], consiste également à mesurer les contraintes résiduelles longitudinales dans une plaque soudée. Comme le montre la figure 12 précédente, une plaque d'acier inoxydable de dimensions 179 mm long \times 120 mm larg. \times 17 mm de profondeur subit un traitement thermique sous vide à une température de 1050°C pendant 1 heure. Un cordon de soudure

de 66 mm de long x 8 mm de largeur et de 2 mm de profondeur approximativement est déposé par la suite sur la plaque

La coupe a été réalisée sur le spécimen par EDM (Electrical discharge machining) avec un fil en laiton de 0,1 millimètres de diamètre suivant la ligne de coupe indiquée à la figure 12. Comme la coupe est perpendiculaire au cordon, le micro-profil obtenu sera celui de la contrainte longitudinale. Après la coupe, les deux surfaces ont été mesurées avec une CMM (Coordinate Measuring Machine). La figure 13 illustre les contraintes obtenues après traitement des micros profils.

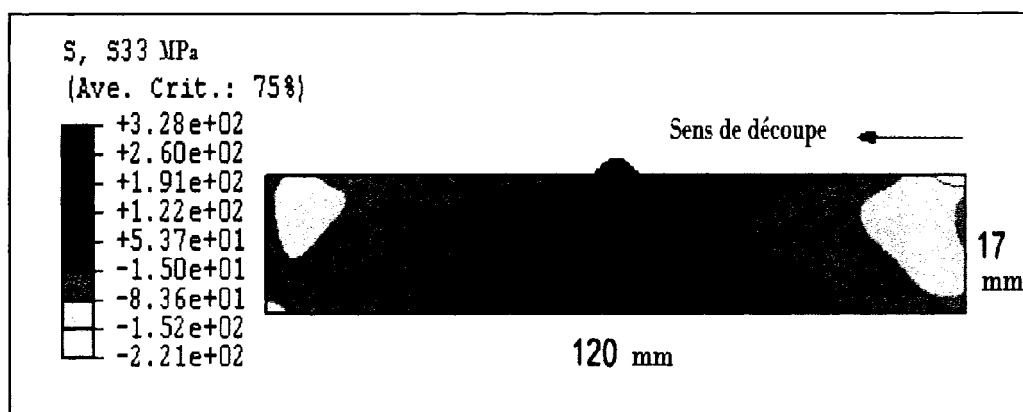


Figure 13 *Champ de contraintes résiduelles longitudinales obtenu par la méthode de micro-profil. (Adapté de Zhang et al [10])*

Les mêmes résultats des contraintes résiduelles longitudinales, mesurés par la méthode de micro-profil, sont tracés cette fois-ci à différentes profondeurs sur la figure 14. Les mesures de découpe ont été accomplies en dépit des erreurs de découpage et qui sont montrées sur la figure 14 par le carrée hachuré.

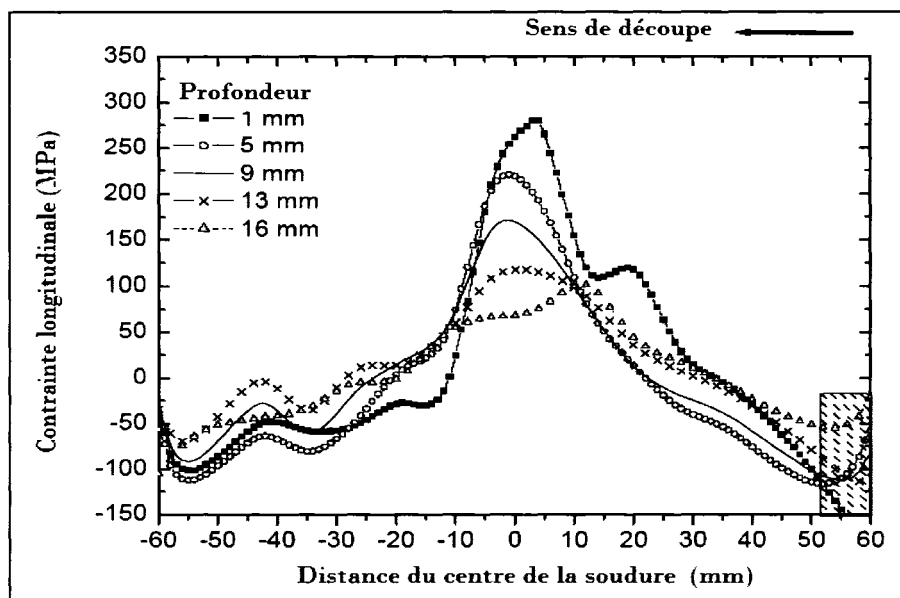


Figure 14 Valeurs des contraintes résiduelles le long de la surface à diverses profondeurs. (Adapté de Zhang et al [10])

Les auteurs ont validé cette technique en comparant les valeurs obtenues par la méthode de micro-profil à des mesures de diffraction de neutrons (voir figure 15). Il est évident que les deux techniques indiquent une même tendance en ce qui concerne la contrainte longitudinale avec une contrainte de tension maximale au centre de la soudure. On constate qu'il y'a un décalage presque uniforme de 50 MPa entre les deux mesures dû aux imprécisions de chacune des méthodes.

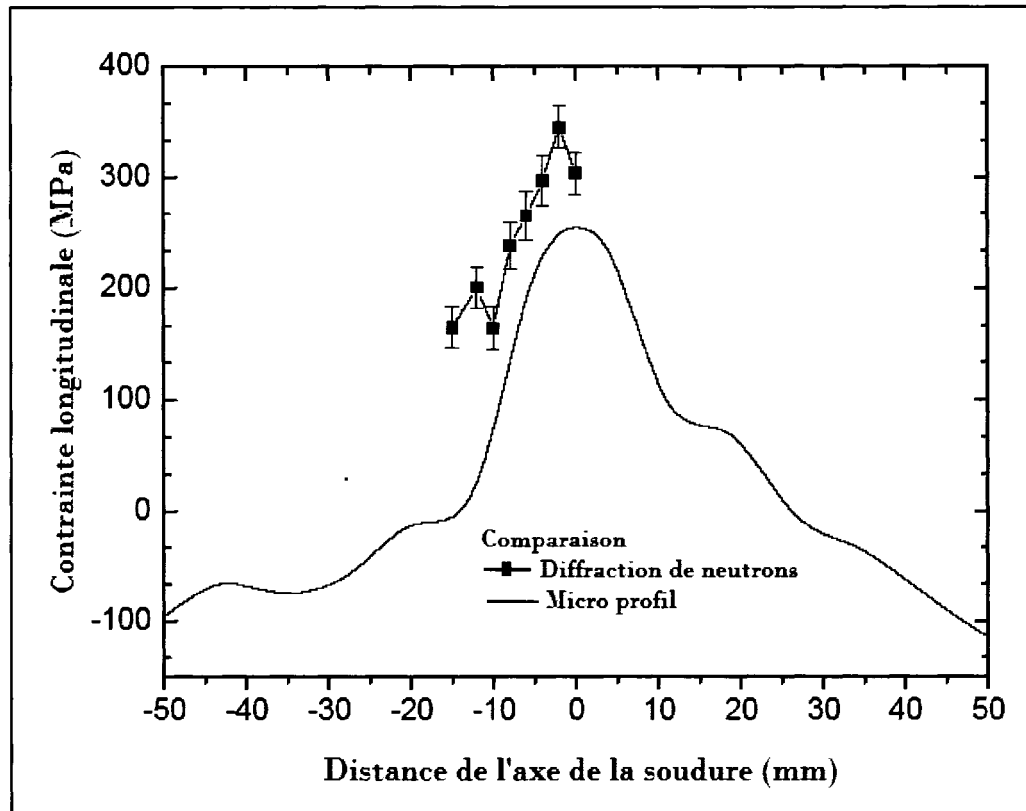


Figure 15 Comparaison des valeurs obtenues par micro-profil et diffraction de neutrons à 2 mm de profondeur. (Adapté de Zhang et al [10])

En résumé, les études courantes ont prouvé que la méthode du micro-profil est une technique puissante capable de mesurer le champ de contrainte résiduelle sur une surface entière et fournir des informations fiables pour toute technologie où les contraintes résiduelles concernées sont primordiales.

Dans ce paragraphe, les articles cités introduisent la méthode de micro-profil de surface utilisée pour la mesure des contraintes sur des échantillons soudés. Toutefois, à travers ce mémoire une analyse sera faite sur la pertinence du bridage lors de la coupe EDM et d'autre part elle propose une méthode de lissage des déplacements mesurés, dus à la relaxation des contraintes, plus détaillée ce qui n'est pas le cas de ce que l'on trouve dans la littérature.

1.3 Effets des traitements de surface sur les contraintes internes

Le travail de DeWald et al [11] se penche sur l'étude de l'effet du martelage laser sur l'alliage 22 (UNS N06022) qui est le matériau proposé comme matériau de revêtement externe des réservoirs de carburant ou dans l'industrie nucléaire pour le stockage de déchets.

Des profils de contraintes résiduelles ont été mesurés en profondeur sur des échantillons de l'alliage 22 en utilisant la méthode de fente (connue sous le nom de « crack-compliance method ») et une distribution 2D de contraintes résiduelles longitudinales a été mesurée dans les soudures sur des spécimens en utilisant la méthode de micro-profil.

Le martelage laser est une technologie naissante de traitement de surface qui a été développée dans les années 70 aux laboratoires de Battelle Columbus, mais son entrée dans le marché a été retardée à cause des limitations de la technologie laser. Comme d'autres traitements de surface similaires, le martelage laser est utilisé en industrie pour produire une contrainte de compression de sorte à retarder l'apparition des fissures et ainsi augmenter la résistance en fatigue. Tandis que d'autres techniques de traitement de surface, tels que le grenaillage ou l'écrouissage, sont seulement capables de produire des contraintes de compression en profondeur de quelques dixièmes de millimètre. Les profondeurs des contraintes résiduelles en compression pour les composants martelées par laser sont typiquement de l'ordre de 1 ou 2 millimètres [11].

La préparation de surface est nécessaire avant le martelage laser. D'abord, une couche protectrice est appliquée en surface ; ceci s'appelle la couche «ablativ» parce que ce revêtement est enlevé pendant le traitement.

Une plaque en alliage 22 de 812 mm de longueur, 200 mm de largeur et 33 mm d'épaisseur, après une préparation en double V, est soudée tout le long. Cette plaque est coupée en quatre échantillons identiques de 200 mm de long tel qu'illustré à la figure 16. Puisque la soudure est faite en continue sur la plaque, on suppose que les contraintes résiduelles de soudage sont identiques dans les quatre échantillons. Deux de ces

échantillons seront utilisés pour la mesure des contraintes résiduelles dues au soudage et au soudage martelage laser exécuté avec une durée d'impulsion de 25 nanosecondes et une densité énergétique de 10 GW/cm^2 en 10 couches. Le martelage laser a été appliqué à une région au centre du spécimen mesurant 100 millimètres dans la direction transversale et 76 millimètres dans la direction longitudinale.

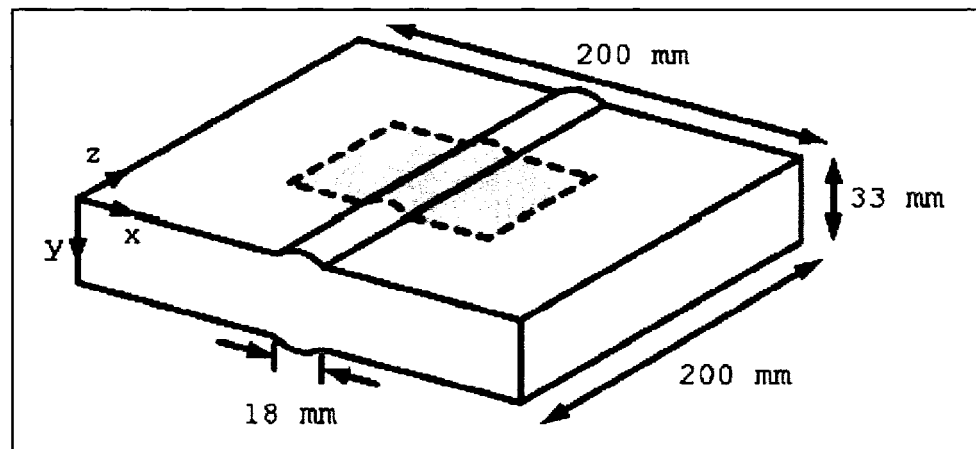


Figure 16 *Dimensions de l'échantillon avec zone de martelage laser.*
(Adapté de DeWald et al [11])

La composante longitudinale de la contrainte résiduelle sur un spécimen soudé et ensuite martelé et un second juste soudée a été mesurée en utilisant la méthode de micro-profil récemment développée. La distribution de ces contraintes résiduelles résultantes est illustrée à la figure 17. Il est à noter que le martelage laser produit une compression uniforme et profonde dans tout le bord traité de la région du bas (voir figure 17(b)).

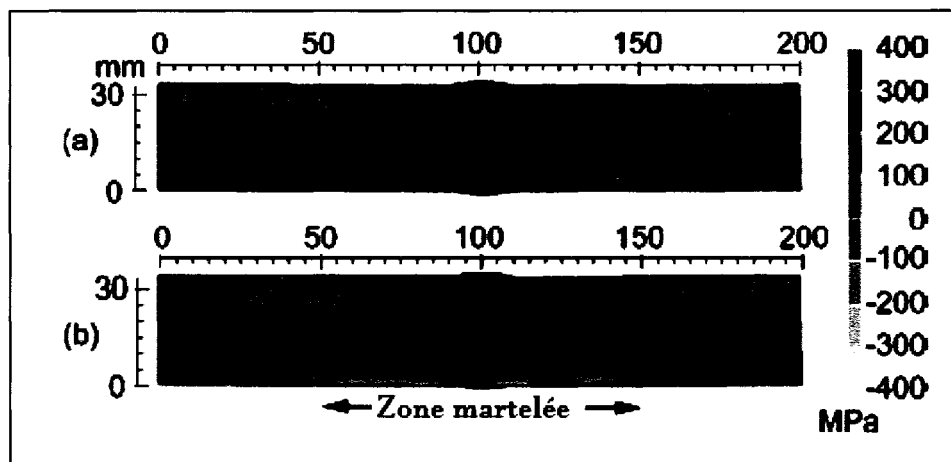


Figure 17 *Champ de contrainte résiduelle mesuré par micro-profil : (a) avant martelage laser, (b) Après martelage. (Adapté de DeWald [11])*

Afin de comparer quantitativement le spécimen soudé et martelé et celui juste soudé, des courbes de la valeur de la contrainte résiduelle en fonction de la profondeur à partir du bas sont montrées pour la position centrale de la pièce à la figure 18 (a), et au bord de la soudure à la figure 18 (b) et en dehors de la soudure à la figure 18 (c). Ces résultats prouvent que le martelage laser est très efficace pour réduire les contraintes résiduelles de tension en surface qui sont produites par le procédé de soudage. À chaque position, le martelage laser a permis d'inverser la contrainte de tension jusqu'à une profondeur d'au moins 4,3 millimètres au centre de la soudure et jusqu'à 7,7 millimètres à 30 millimètres de la position centrale.

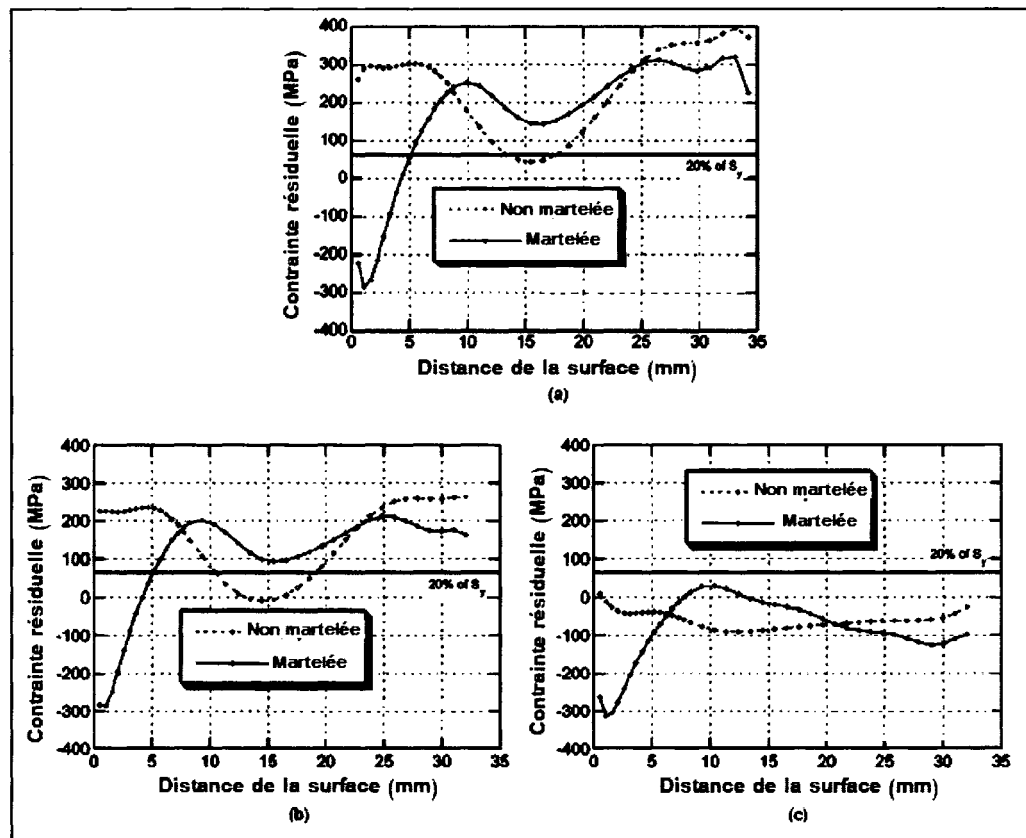


Figure 18 Valeurs de la contrainte résiduelle avant et après martelage : (a) Au centre du cordon. (b) À la frontière de la soudure (à 9 mm du centre). (c) En dehors du cordon (à 30 mm du centre). (Adapté de DeWald [11])

Un des choix important lors de cette expérience était celui d'une technique de mesure de contraintes résiduelles permettant d'étudier tous les paramètres du procédé et de fournir des résultats pour la comparaison. Les travaux précédents ont obtenu de bons résultats en utilisant la diffraction des neutrons pour mesurer des profils de contraintes dans les spécimens martelés par laser. Bien que la méthode XRD, quoique ponctuelle, soit un outil valable pour mesurer la contrainte résiduelle proche de la surface, il est difficile d'employer cette technique pour mesurer des contraintes en profondeur.

L'aspect le plus significatif, des résultats présentés ici, est la profondeur des contraintes résiduelles de compression dans l'alliage 22 dues au martelage laser. La profondeur de la contrainte résiduelle compressive est une fonction de la profondeur de la déformation

plastique induite par le martelage laser et de la géométrie de la pièce. En effet, une géométrie épaisse montrera une contrainte en compression plus profonde qu'une géométrie mince.

Meo et al [12], dans le même ordre d'idée, dans leur étude de simulation de l'effet de l'écrouissage en surface par grenaillage, relèvent l'importance de la variation des contraintes résiduelles dues au soudage grâce à cette méthode de traitement de surface. Les contraintes en compression nouvellement instaurées augmentent la vie en fatigue et en fatigue-corrosion.

Le grenaillage est un processus d'écrouissage exécuté à froid, c'est-à-dire à la température ambiante, durant lequel la surface subit l'impact de petites billes sphériques habituellement d'acier, qui provoque des déformations plastiques. Les billes sont projetées contre la surface formant ainsi une empreinte sur la surface de travail causant l'écoulement plastique dans la zone extérieure de l'impact.

Afin de déformer de manière permanente la surface de la pièce traitée, la contrainte appliquée sur le matériau doit excéder sa contrainte limite dans le domaine élastique. Le procédé produit l'étirage de l'extrados et la déformation plastique au niveau de l'empreinte de la bille, cela se traduit par des contraintes résiduelles de compression. Lors du déchargement, les fibres placées au-dessous de l'empreinte essaient de recouvrir leur forme originale alors que la matière environnante ne permet pas à ceci de se produire. Par conséquent, une région de contrainte de compression est produite tel qu'illustré à la figure 19.

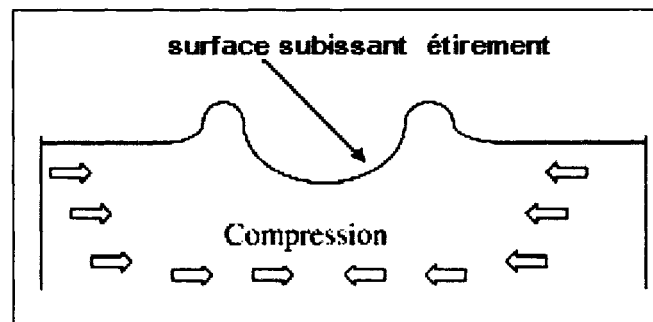


Figure 19 *État de contrainte généré par grenaillage*
(Adapté de Meo et al [12])

Les assemblages soudés qui sont sujets au grenaillage pour finaliser leur état de surface voient leur niveau de contraintes induites par soudage abaissé. Des diminutions significatives peuvent être réalisées. Le niveau de la réduction dépend fortement de plusieurs facteurs, tels que l'épaisseur des plaques, les propriétés du matériau, la vitesse de l'impact etc.

Ce travail est concentré sur le développement d'un modèle numérique à l'aide de la méthode des éléments finis pour prévoir l'importance et la distribution de la déformation et des contraintes résiduelles associées au processus d'impact. Cette approche donnera la possibilité de prévoir l'état final du matériau sans nécessiter la réalisation des essais de laboratoire et aidera à la compréhension et à la conception d'un nouveau procédé de grenaillage permettant d'atteindre le champ de contrainte résiduel désiré. La distribution des efforts résiduels évalués sur la surface supérieure au point d'impact est illustrée à la figure 20.

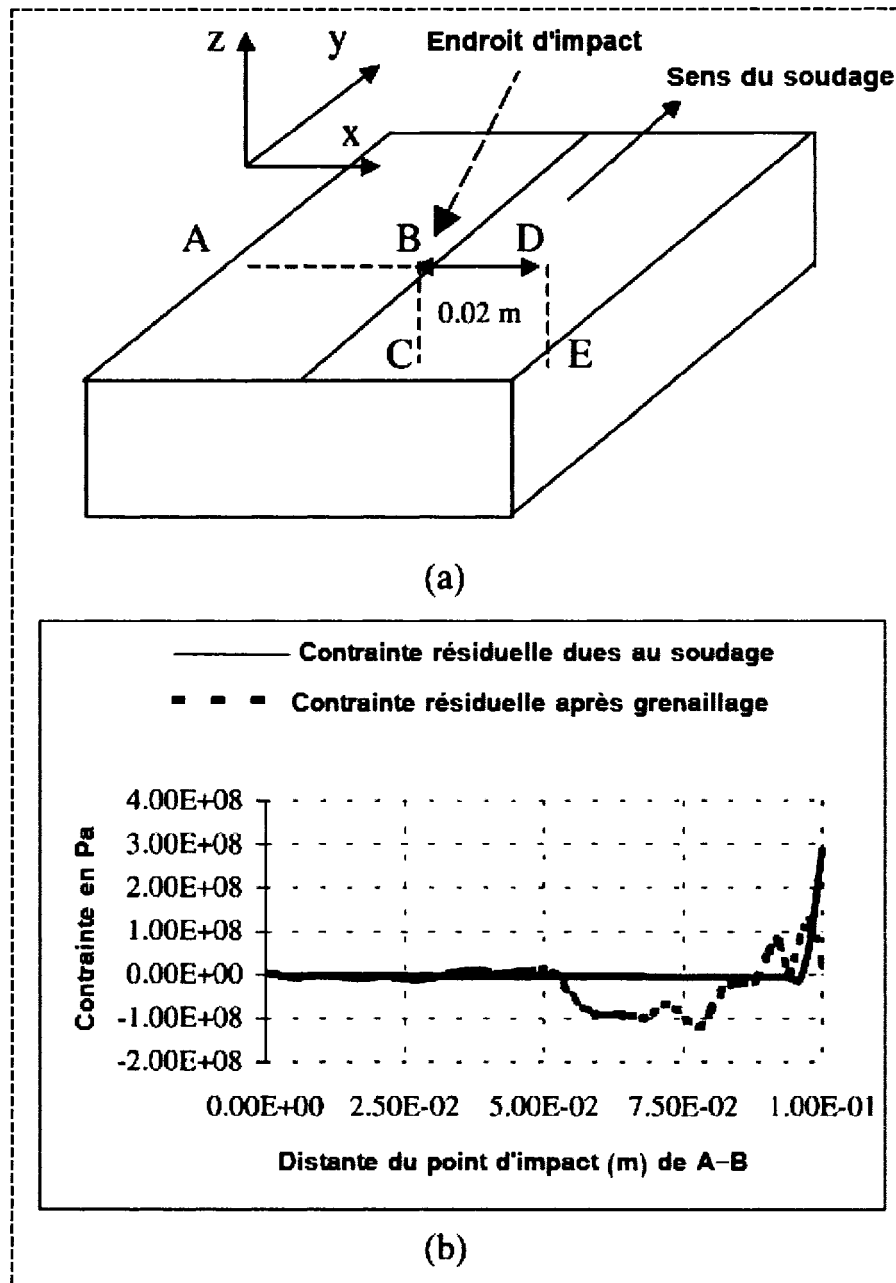


Figure 20 Mesures des contraintes résiduelles : a) Lignes de mesure, (b) Évaluation de la contrainte résiduelle avant et après grenaillage sur A-B. (Adapté de Meo et al [12])

La contrainte maximale dans la soudure, après impact ponctuel au point B, est fortement abaissée de 330 à 27 MPa (figure 20(b)). Un maximum de 143 MPa est calculé à l'intérieur

de la pièce dans la zone affectée thermiquement, tandis qu'à 0,15 millimètre, dans la zone en dehors de la ligne de soudage, on estime qu'une compression résiduelle règne.

Les valeurs des contraintes résiduelles évaluées à travers l'épaisseur de la pièce, au point de l'impact, sont illustrées à la figure 21 (B-C). Sous le point d'impact règne un état de tension. Cependant, à une profondeur de 0,03 m sous le point d'impact, la valeur de la contrainte diminue d'intensité et passe de 330 MPa, initiale avant grenaillage, à 75 MPa ce qui représente une réduction importante.

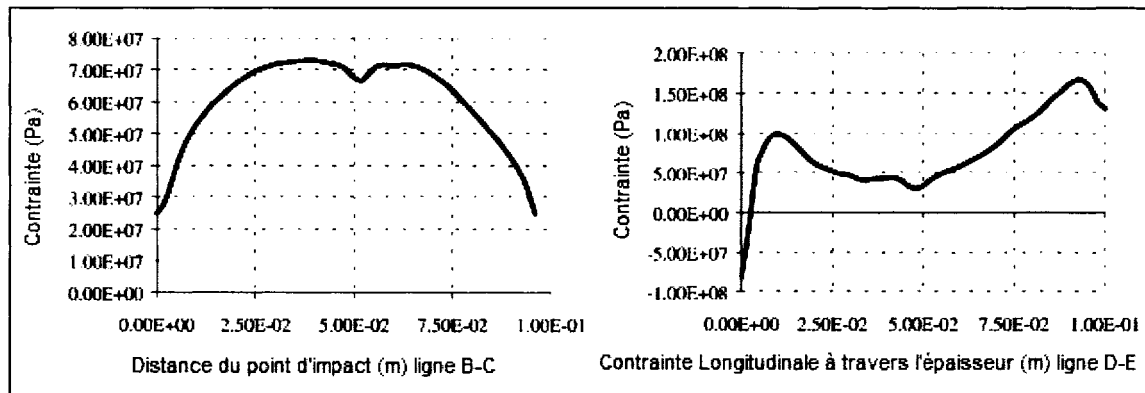


Figure 21 *Contraintes résiduelles longitudinales en profondeur sur les lignes B-C et D-E. (Adapté de Meo et al [12])*

La distribution des contraintes résiduelles à travers l'épaisseur de la pièce à 20 mm de la ligne de soudure est illustrée à la figure 21 (D-E). Une contrainte de compression de 75 MPa est obtenue en surface. Ces résultats démontrent les possibilités du procédé de grenaillage à réduire efficacement les contraintes résiduelles de tension induites par le soudage et par conséquent augmenter la vie en fatigue des assemblages soudés.

Ce mémoire, en plus d'évaluer les contraintes résiduelles dues au soudage par la méthode de micro-profil, traite également d'une autre méthode de traitement de surface soit le martelage mécanique. Il vise à démontrer son efficacité par rapport aux méthodes de

traitement de surface mise en revue, car il génère des contraintes résiduelles de compression plus importantes ce qui abaisserait ou annulerait le champ de contraintes résiduelles de tension produit par le procédé de soudage, et sera utile pour la mise en œuvre de la méthode de mesure de micro-profil de surface dans le cas de figure où les contraintes résiduelles sont en compression.

1.4 Revue des méthodes de mesures usuelles

Les méthodes de mesure des contraintes résiduelles peuvent être décomposées en deux catégories ; les méthodes dites " destructives " et les méthodes dites " non destructives " (voir tableau II).

Tableau II

Méthodes de mesure usuelles

Méthodes destructives (Méthodes mécaniques)	Méthodes non destructives (Méthodes physiques)
Méthode du trou (RS200)	Méthode par diffraction des rayons X (XRD)
Méthode de déflexion	Méthode par diffraction de neutrons
Méthode par découpage	Méthodes magnétiques
	Bruit de Barkhausen
	Magnetostriction

Le principe des méthodes basées sur la première catégorie est de détruire l'équilibre initial des contraintes résiduelles et de mesurer les conséquences de cette relaxation (déplacements, déformations, etc.). Les contraintes résiduelles sont ainsi déduites, aux points de mesure, par des méthodes analytiques et numériques.

Par exemple la méthode du trou, connue sous le nom anglais « Hole drilling », consiste à relaxer localement les contraintes résiduelles au point de mesure et à enregistrer les déformations résultantes. Une rosette rectangulaire ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$) est collée au point de

mesure et un petit trou est percé au centre de cette dernière. Les contraintes résiduelles présentes dans la région du trou sont alors relâchées et les déformations locales suivant les directions des jauges de la rosette sont enregistrées. À l'aide d'une procédure de calcul développée et validée par Vishay Measurements Group (1993) et normalisée par l'ASTM (1999), l'état de contraintes avant perçage est évalué en fonction de la variation des déformations, en prenant en compte la profondeur du trou. Les limitations en profondeur de la méthode sont données dans le tableau III.

Quant à la méthode de déflexion, son application consiste en l'enlèvement de minces couches en surface. La pièce soumise à des contraintes internes se courbe sous l'influence de la modification du champ de contraintes afin de restaurer le nouvel équilibre de ces contraintes résiduelles. À partir de la déflexion de la pièce, il est possible d'établir le profil des contraintes résiduelles initiales.

Dans la seconde catégorie, on utilise un principe physique connu pour mesurer les déformations élastiques du réseau cristallin, auxquelles on associe des contraintes à l'aide de la théorie d'élasticité. Ces méthodes permettent d'évaluer de façon non destructive les contraintes de surface et en profondeur. Mais dans le cas de la méthode des rayons X, l'accès au profil des contraintes présentes en sous-couche ne peut se faire que grâce à la technique d'enlèvement de matière par couches successives (usinage par électroérosion). Dans le cas de la méthode des ultrasons, on s'appuie sur la différence de temps de propagation d'ondes ultrasonores pour mesurer directement les contraintes résiduelles toutefois, la méthode ne donne pas de résultats précis car cette différence de vitesse de propagation est parfois très faible. Cependant, ces méthodes sont sensibles aux changements de la microstructure, notamment à la dimension et à l'orientation des grains dans le matériau comme il est le cas généralement dans un assemblage soudé.

Withers et al [13] et [14] regroupent les différentes méthodes les plus communément utilisées dans le tableau III, où ils spécifient les qualifications et les limitations spatiales de chacune d'elles.

Tableau III

Sommaire des méthodes de mesure et leurs attributs
(Adapté de Withers et al [13])

Méthode	Pénétration	Résolution spatiale	Précision
RS200	~ 1.2* \varnothing du trou	50 μm de profondeur	± 50 MPa augmente avec la profondeur
Découpe	0.1-0.5 d'épaisseur	0.05 de l'épaisseur	limité par le rayon de courbure minimum mesurable
XRD	<50 μm (Al); <5 μm (Ti)	1 mm latéralement;	± 20 MPa limité par la non linéarité
	<1 mm (enlèvement de couche)	20 μm profondeur	de $\sin^2(\psi)$ ou l'état de surface
Neutrons	200 mm (Al) ; 25 mm (Fe); 4 mm (Ti)	500 μm	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$ de déformation
Ultrason	> 10 cm	5 mm	10 %
Magnétique	10 mm	1 mm	10 %
Raman	< 1 μm	1 μm environ	$\Delta \lambda^2 \sim 0.1 \text{ cm}^{-1} \equiv 50 \text{ MPa}$

Ces méthodes, reposant sur des principes physiques différents, sont complémentaires mais cependant sont soit très délicates et longues dans leur mise en œuvre ou exigent des équipements très sophistiqués et par conséquent onéreux. En effet, plusieurs de ces méthodes ne pourraient être appliquées dans le quotidien d'une entreprise puisque le coût d'acquisition de l'équipement nécessaire serait élevé et un profil de personnel spécialisé est nécessaire comme dans le cas de la méthode de la diffraction des neutrons.

Ces inconvénients que présentent chacune des méthodes de mesures ont été à l'origine d'exploration d'autres voies c'est-à-dire d'autres méthodes de mesures qui pourraient par conséquent demander moins d'efforts tout en donnant le plus possible d'informations sur un champ de contraintes résiduelles dans le matériau sans que les moyens mis en œuvre

soient inabordables au point de vue économique. Le choix s'est ainsi porté sur la méthode du micro-profil d'une surface de coupe, qui est une méthode destructive certes, mais qui a l'avantage de couvrir un champ plus étendu que les autres méthodes destructives qui donnent uniquement des résultats ponctuels.

1.5 Conclusion et objectifs

A travers la littérature, l'accent est mis en premier lieu sur la présence des contraintes résiduelles qui sont le résultat d'un processus thermique généré par le soudage dans les assemblages joints par ce procédé. Il a été montré que des contraintes sont induites dans le matériau et dépendamment de la géométrie des pièces et du nombre de passes du soudage, ces contraintes peuvent être très importantes et cela pourrait affecter le fonctionnement normal de ces assemblages.

Cette première section met l'accent également sur l'utilisation de certaines méthodes de traitement mécaniques de surface qui sont employées afin d'inverser les contraintes résiduelles de tension, induites par un quelconque procédé de fabrication. Les concepteurs ont recours à ces traitements de surface tel le martelage parce qu'ils sont plus simples dans leur exécution que les traitements thermiques où ils sont confrontés aux problèmes d'espace des enceintes thermiques.

Afin d'évaluer ces contraintes résiduelles, qu'elles soient induites par le soudage ou par un traitement de surface (sachant que l'évaluation de ces contraintes est nécessaire pour la phase de conception ainsi que pour la compréhension du fonctionnement des pièces en service), la méthode de micro-profil est choisie puisqu'elle permet de mesurer des contraintes sur un profil total normal à une surface de coupe. Ainsi ce mémoire présente d'une manière détaillée la méthodologie de la mise en œuvre de la méthode de micro-profil en question.

L'analyse numérique liée à la méthode de mesure sera présentée : elle consiste à calculer le champ de contraintes résiduelles à l'aide de la méthode des éléments finis, en imposant les déplacements mesurés à la section du plan de coupe afin de générer les données d'entrée au

logiciel d'éléments finis. Un programme de traitement de ces mesures de profil est développé et succinctement présenté. La partie expérimentale de la méthode consiste, quant à elle, à valider cette méthode par comparaison avec la méthode du trou, à l'aide de jauges d'extensomètre et XRD. Elle comporte un échantillon soudé pour la validation de la méthode d'une part et d'autre part, elle permettra d'évaluer l'amplitude des contraintes résiduelles induites par soudage ainsi que l'étude de l'effet du martelage, comme méthode de traitement de surface, sur la variation de ces contraintes internes. Finalement, l'ensemble des résultats sera discuté en se référant aux contraintes résiduelles mesurées.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DE MICRO-PROFIL DE SURFACE

La mesure et la validation des contraintes résiduelles par la méthode de micro-profil constituent le thème principal de ce travail. L'objectif le plus important est donc de disposer de valeurs de contraintes réalistes et de confronter entre elles différentes méthodes de mesure. La validation est donc primordiale afin de porter un jugement sur l'acceptation ou non de cette méthode et de la méthodologie suivie.

La méthode de micro-profil de surface repose sur le principe de la mesure de la relaxation des contraintes résiduelles suite à une coupe effectuée sur une pièce. En effet, l'interprétation de la mesure des déplacements résultant du nouvel équilibre, qui s'est établi à la suite de cette coupe, est faite selon la théorie d'élasticité linéaire des corps déformables. Dans notre cas, on applique ce principe à une coupe plane, selon une direction bien identifiée, et le relief résultant de la coupe est mesuré par un appareil laser.

La relaxation des contraintes produit donc des déplacements suivant le sens perpendiculaire à la coupe. Cette dernière est réalisée par la méthode d'électroérosion (EDM). Le champ de déplacements, résultant de la coupe, suit la répartition du champ de contrainte dans la pièce (voir figure 22), et, selon les équations de l'élasticité, les contraintes obtenues sont donc celles qui résidaient dans le matériau avant la coupe.

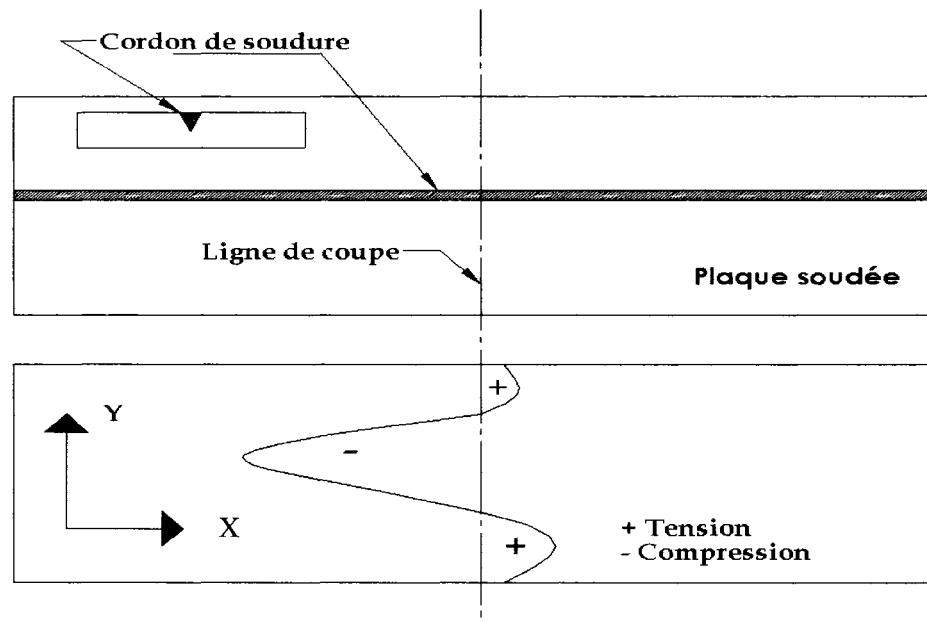


Figure 22 *Principe de relaxation des contraintes résiduelles.*

Les déplacements, obtenus après relaxation des contraintes résiduelles suivant la direction de l'axe x comme sur la figure 22, sont mesurés à l'aide d'un appareil à faisceau laser « Profilomètre » (que nous décrirons plus loin). C'est à partir de ces mesures que débute l'étape du calcul des contraintes résiduelles. Une méthodologie a été élaborée pour traiter ces mesures avant d'aboutir au code des éléments finis afin de déterminer par calcul numérique les contraintes en surface, toujours sur le plan normal à la direction du cordon de soudure de la plaque où la coupe a été effectuée.

Pour mettre en pratique la méthode de micro-profil de surface, il faut respecter la chronologie des opérations suivantes tout en donnant à chacune l'intérêt nécessaire pour minimiser les erreurs dues à chacune de ces manipulations.

2.1 Méthode de coupe

Le choix de la méthode à utiliser pour faire la découpe dans le matériau est extrêmement important du fait que l'écart sur la mesure est de l'ordre du micron. Il faut donc opter pour une méthode qui donnerait une résolution minimale de l'ordre du micron au moment de sa

mise en oeuvre. La méthode EDM (Electrical Discharging Machining) permet effectivement d'atteindre la précision recherchée.

Avec l'électroérosion ou EDM, la découpe dans une pièce se fait à l'aide d'un fil métallique (électrode) le long d'un contour programmé. Dans la zone où l'usinage se produit, chaque décharge crée un cratère (fragment de matière éjecté, au fur et à mesure, le long de la trajectoire) ce qui permet la découpe sans que le fil ne vienne jamais en contact direct avec la pièce. Bien qu'il n'y ait pas de contact entre l'électrode et la pièce, le fil subit tout de même une usure, ce qui impose en cas pratique d'utiliser une bobine pour que le fil puisse se dérouler au fur et à mesure de l'avancement de la coupe, compensant ainsi son usure. La découpe doit toujours être traversante puisqu'il faut dégager le fil ou l'électrode sans retourner sur la portion déjà découpée de la surface, ce qui provoquerait l'enlèvement de plus de matière en cette portion et serait préjudiciable à l'obtention de bons résultats. Il faut donc que la matière soit enlevée avec une régularité constante sur tout le parcours de la coupe. La figure 23 présente un exemple du principe simplifié de la coupe EDM.

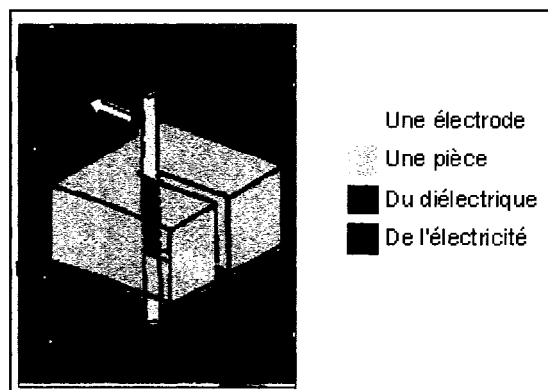


Figure 23 *Méthode de coupe à l'EDM.*

Le fil électrode, utilisé pour découper les aciers, est le plus souvent en cuivre ou en laiton et il mesure entre 0.2 et 0.3 mm de diamètre. Dans le cas présent, nous avons utilisé un fil ayant un diamètre de 0.25 mm, donnant une résolution de surface de 0.2 μm , ce qui est très acceptable compte tenu du fait que les déplacements à mesurer pourraient se situer trois ordres de grandeur au-dessus de cette valeur. L'état de surface est donc important pour

éviter d'obtenir des profils « en dents de scie » qui seraient attribuables à une rugosité de surface provenant d'une mauvaise coupe.

2.2 Découpe des plaques

La découpe à l'EDM est la première opération, et la plus critique également, dans la mise en œuvre de la méthode de mesure de micro-profil. Le traitement des données et le calcul numérique reposent sur l'exécution et la qualité de la coupe.

Contrairement à l'article de Prime et al [7,8] qui présente la méthode de micro-profil, il n'est pas essentiel ou nécessaire de procéder à trois coupes parallèles sur la plaque échantillon, la seule coupe requise étant celle pratiquée à l'endroit où les contraintes sont à déterminer (voir figure 24). Une correction de la planéité devra cependant être faite numériquement. En effet, une fois que les déplacements, résultats de la relaxation des contraintes résiduelles, seront mesurés, ils seront multipliés par des facteurs de corrections que nous verrons plus loin.

Il est toutefois important de brider correctement la plaque pour éviter tout déplacement lors de la progression de la coupe et de minimiser les distorsions de la plaque lors de cette opération.

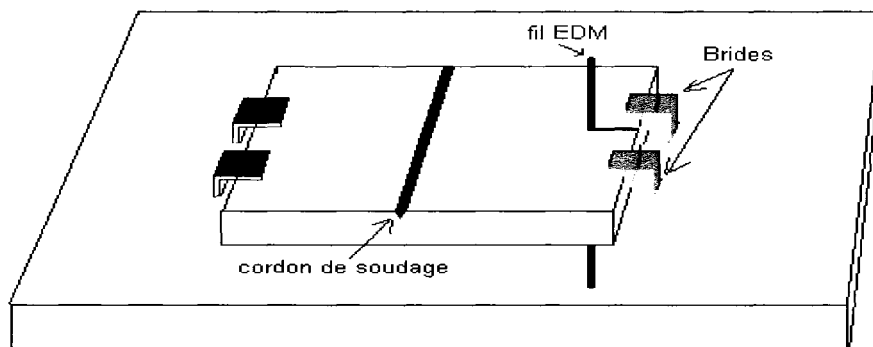


Figure 24 *Ligne de coupe EDM sur la plaque soudée.*

Les deux coupes extérieures, effectuées sur la plaque de part et d'autre de la première coupe à l'endroit de la mesure, peuvent être évitées si les résultats de la mesure avec une seule coupe sont traités adéquatement comme ce qui se fait dans la démarche décrite ci-après.

2.3 Méthode de mesure du profil des déplacements résultants

La prise de mesure des déplacements, sur la surface de coupe, constitue le point de départ du processus d'évaluation des contraintes résiduelles par calcul numérique. La densité de points mesurés et la précision sont essentielles. L'appareil de mesure, un profilomètre de type JAVELIN de la compagnie UBM, est muni d'une caméra laser, et d'un mécanisme de balayage en continu de la surface d'analyse (voir figure 25).

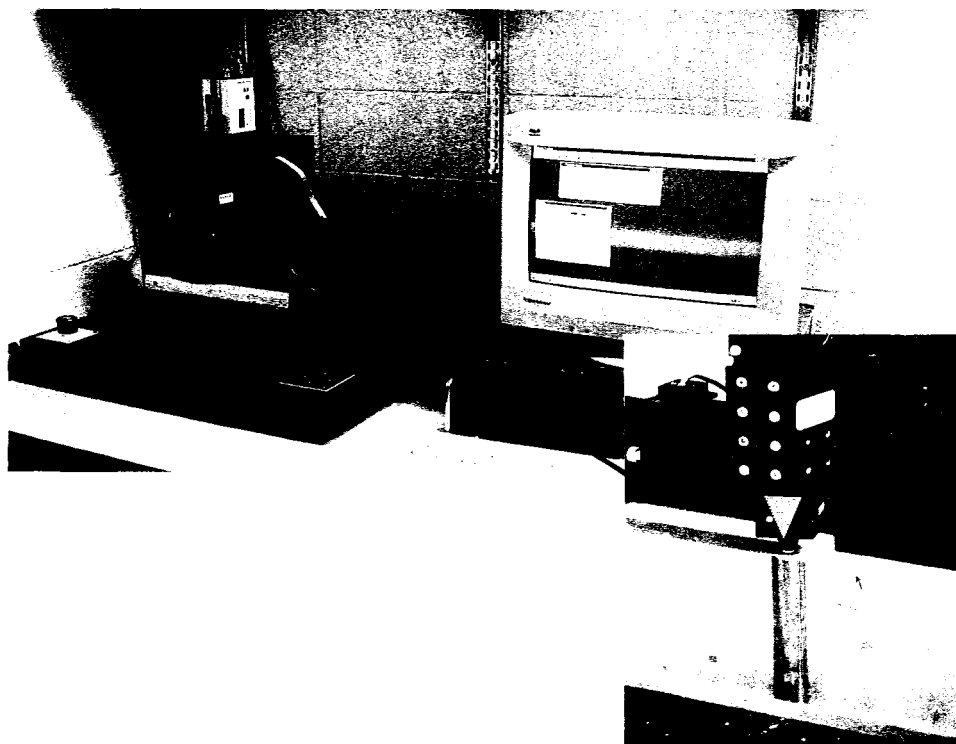


Figure 25 *Caméra laser pour la mesure par balayage.*

Les dimensions maximales de la surface d'analyse que permet cet appareil sont de 150 mm par 150 mm. L'utilisateur spécifie les limites de la surface de la pièce pour que le balayage se restreigne à celles-ci, ainsi que le nombre de points à mesurer par mm dans chacune des directions. La hauteur limite pour assurer un passage libre de la pièce sous la caméra est de 150 mm, mais elle pourrait s'ajuster à une hauteur maximale plus grande à l'aide de supports spéciaux de la camera ou des rallonges. La précision ou l'amplitude maximale des mesures est fixée suivant le réglage et le besoin de l'utilisateur, elle est soit de ± 50 ou de ± 500 μm . Le temps de balayage est limité grâce à un logiciel qui gère la mesure et qui fonctionne avec une interface Windows offrant une simplicité d'utilisation. Durant le balayage, le résultat de la mesure apparaît au fur et à mesure à l'écran du moniteur sous forme graphique. Une fois le balayage achevé, le logiciel permet de générer un fichier texte comportant la valeur de la position en hauteur de tous les points générés par le balayage de la caméra.

Au départ, la pièce est positionnée sur la table de sorte que chaque point se retrouve dans la zone de travail de la caméra (voir figure 26) décrite par le contour hachuré. En effet, la surface mesurée est plus petite que le contour réel de la pièce à cause des distorsions de la plaque engendrées lors du soudage ou du martelage. Les axes Z et Y de mesure sont ensuite définis ainsi que la direction du balayage selon ces axes. Il faut définir également les coordonnées Z-Y du point de départ du balayage, ce point constituant l'origine de ce système d'axes. Ce point de référence est aussi l'origine de l'axe Z de la mesure du profil.

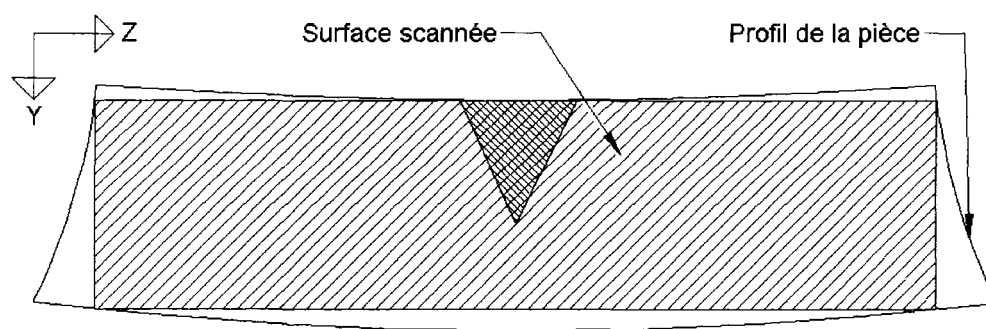


Figure 26 Contour limite de la surface de mesure.

Le résultat obtenu à partir d'un balayage est une matrice contenant les valeurs de la hauteur en x de chaque point (z, y) de la surface mesurée dans le plan. La représentation matricielle des coordonnées de ces points suit la numérotation des lignes et colonnes de la matrice. La taille de cette matrice est fonction de l'espacement entre les points de mesure qui est fixé par l'utilisateur, et des dimensions de la surface scannée.

2.4 Méthode de traitement des données avant calcul

Les déplacements mesurés précédemment par caméra laser sont recueillis dans un fichier texte. Ces données sont par la suite lues par un programme Fortran et stockées dans une matrice de dimensions « (nombre de lignes +1) * (nombre de colonnes +1) » pour ensuite être traitées préalablement au calcul des contraintes. Les traitements numériques appliqués aux données mesurées sont le filtrage en premier lieu puis le lissage qui nous permettra également d'obtenir une fonction polynomiale représentative des valeurs mesurées (voir programme Fortran en annexe). Cette fonction résultat du lissage représentera notre input dans le calcul par éléments finis. Un exemple de traitement sera donné au fur et à mesure de la présentation afin de mieux l'illustrer.

2.4.1 Filtrage des valeurs

Les valeurs en z de la surface analysée contiennent un bruit indésirable (une variation importante entre la valeur en un point et celle des points voisins), qui est d'autant plus important que la densité des points mesurés est grande. Pour diminuer l'intensité de ce bruit, les données sont en premier lieu filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas caractérisé par sa dimension et ses coefficients, les coefficients du tableau déterminent les propriétés du filtre dont l'opérateur 3x3 est le suivant.

$$W = \frac{1}{9} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Ce type de filtrage est généralement utilisé pour atténuer le bruit et consiste à remplacer la valeur en UX_{ij} du point (z_i, y_i) par la moyenne des valeurs avoisinantes et lesquelles sont, dans notre cas, pondérées de la même façon. L'équation (2.1) montre la façon dont les valeurs UX filtrées sont obtenues à partir des valeurs mesurées. Le programme de l'annexe 2 permet de faire ce calcul.

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} UX_{11} \\ \vdots \\ UX_{n1} \end{bmatrix} & \begin{array}{c} \nearrow UX_{ij} \\ \\ \end{array} & \begin{bmatrix} UX_{1m} \\ \vdots \\ UX_{nm} \end{bmatrix} \\
 \text{Data filtrés} & & \text{Data brutes}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 = \frac{1}{9} * \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 W_{ij} * UX_{(i-k)(j-l)} \\
 \nearrow
 \end{array}
 \quad (2.1)$$

Le résultat de ce filtrage, visualisé pour un seul profil, est illustré à la figure 27 où une grande partie du bruit est éliminé en préparation à l'étape du lissage.

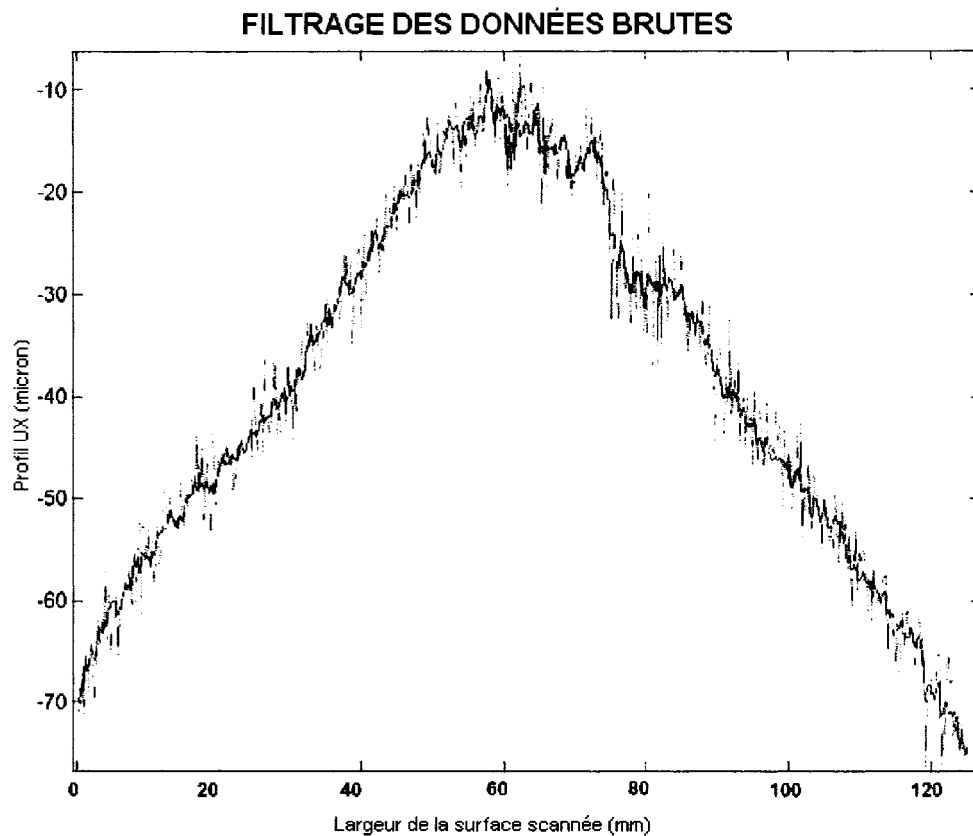


Figure 27 *Résultat du filtrage des données brutes tracé sur une ligne.*

2.4.2 Lissage et fonction d'approximation

L'opération de lissage sert à atténuer l'effet d'escalier produit lors de l'acquisition des déplacements. L'approximation du profil par la méthode des moindres carrés permet d'obtenir à la fois le lissage (ce traitement des données nous permet d'éliminer les bruits ponctuels provenant du balayage lors de la mesure des déplacements et après filtrage) et de déterminer la fonction mathématique représentative du profil sur toute la surface de coupe, qui sera utilisée en entrée dans le calcul des contraintes par la méthode des éléments finis.

Soit le profil UX_1 , dont les coordonnées dans le plan de mesure sont $\{Z_1, Y_1\}$, pour les k points de la surface mesurée, on cherche le polynôme de degré n (avec $n < k$), la somme quadratique des résidus est donnée par :

$$UX(y, z) = b_0 + b_1 z + b_2 y + b_3 z^2 + b_4 z \cdot y + b_5 y^2 + b_6 z^3 + \dots + b_m y^m \quad (2.2)$$

qui minimise l'écart entre les valeurs expérimentales et le polynôme au sens des moindres carrées.

$$E = \sum_{l=1}^k \left[UX_l - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i (a_{2*i+j-1} z_l^{i-j} \times y_l^j) \right]^2 \quad (2-3)$$

L'optimisation des coefficients du polynôme au sens des moindres carrés se fait par résolution du système des m équations obtenues par les dérivées de E, soit :

$$\frac{\partial E}{\partial b_s} = 0 \quad \text{où } s = 1 \text{ à } m \quad \text{et } b_s = a_{2*i+j-1} \quad (2-4)$$

Ainsi à partir des (m) équations normales obtenues à partir de l'équation (2-3) (avec m= ((n+1)*(n+2)/2)), les (m) inconnues «b_m» qui sont les coefficients du polynôme recherché sont déterminés par la résolution de ce système linéaire. De ce fait le polynôme d'approximation de la surface expérimentale (programme à l'annexe 2) est obtenu.

Le choix du degré du polynôme «n» est l'étape la plus délicate de l'algorithme puisqu'il conditionne la qualité du lissage. En effet, plus ce dernier sera élevé plus le polynôme aura tendance à raccorder tous les points de la surface. Un choix inopportun du degré pourrait influencer de manière indésirable les résultats obtenus. C'est pourquoi il devient nécessaire de trouver un critère de choix du degré du polynôme pour obtenir un lissage continu tout en restant le plus proche des points mesurés. Le critère le plus utilisé dans ces cas de figure est l'estimateur non biaisé de la variance des UX_i, défini par :

$$\sigma_n^2 = \frac{\sum_{k=1}^m (UX_k - P_n(z_k, y_k))^2}{m - n - 1} \quad (2-5)$$

On choisit le premier 'n' permettant à σ_n^2 d'atteindre une valeur dans une zone stationnaire. Appliquant ce critère à notre exemple, i.e. en calculant la variance en fonction du degré du polynôme, on obtient la figure 28 :

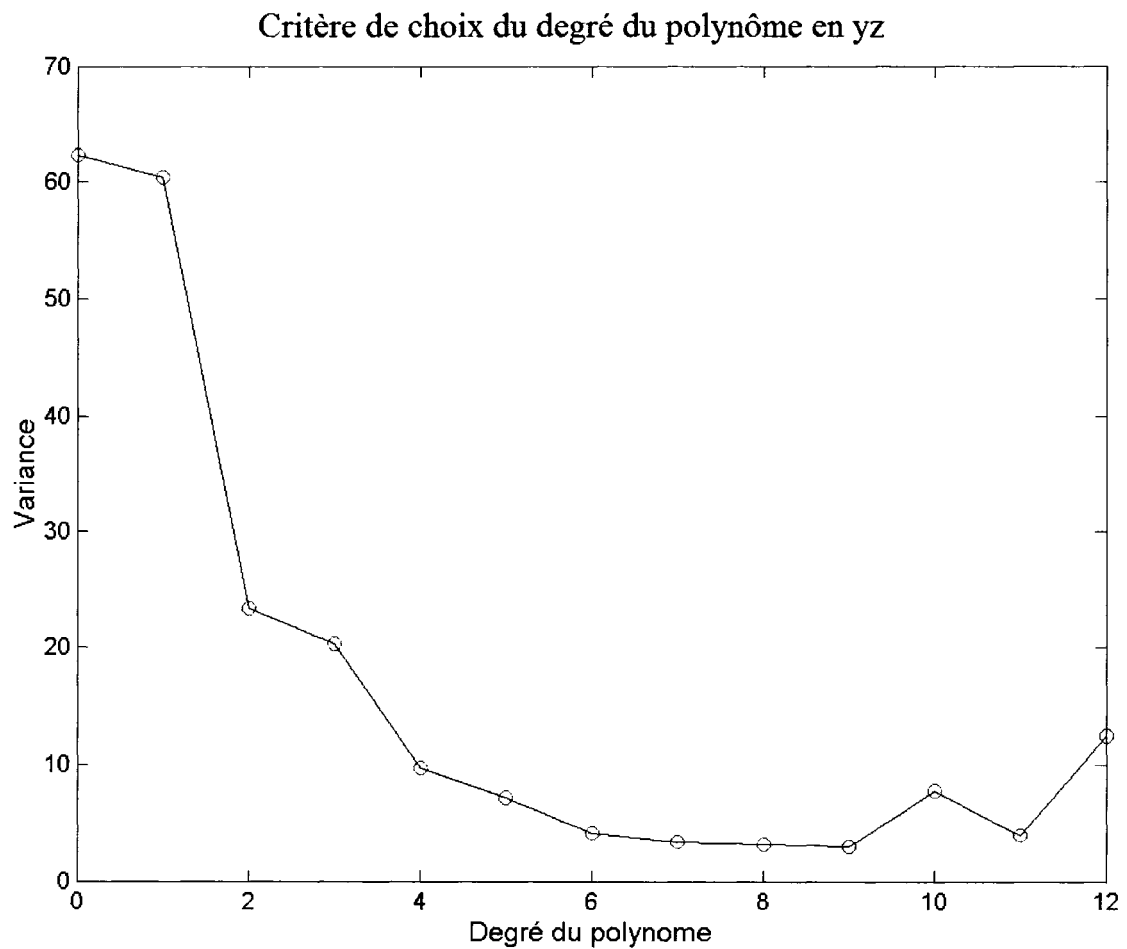


Figure 28 Variation de la variance σ_n^2 en fonction du degré du polynôme.

Le premier « n » ou degré du polynôme à choisir dans la zone stationnaire serait donc ici approximativement l'ordre 7. D'ailleurs lorsqu'on calcule l'écart moyen entre les valeurs brutes et celles lissées (voir figure 29), on s'aperçoit qu'effectivement l'écart est minimal entre les degrés 7 et 9.

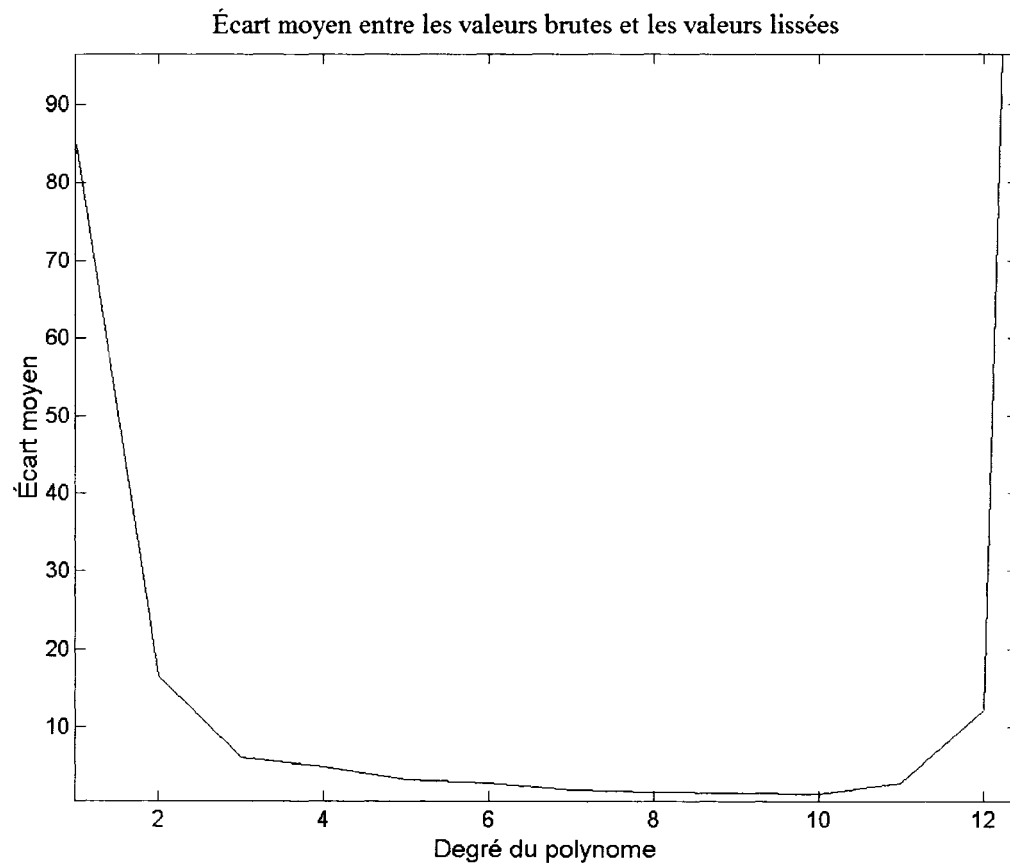


Figure 29 *Écart moyen en fonction du degré du polynôme.*

Après filtrage des données brutes et détermination du degré du polynôme par le lissage, la fonction représentative des points mesurés sur toute la surface est obtenue en calculant les coefficients du polynôme d'approximation. Le résultat de cette approximation dans le plan est représenté par la figure 30, qui représente uniquement une coupe suivant la largeur de la surface de mesure ($y = \text{Cte}$) pour mieux visualiser l'effet du lissage.

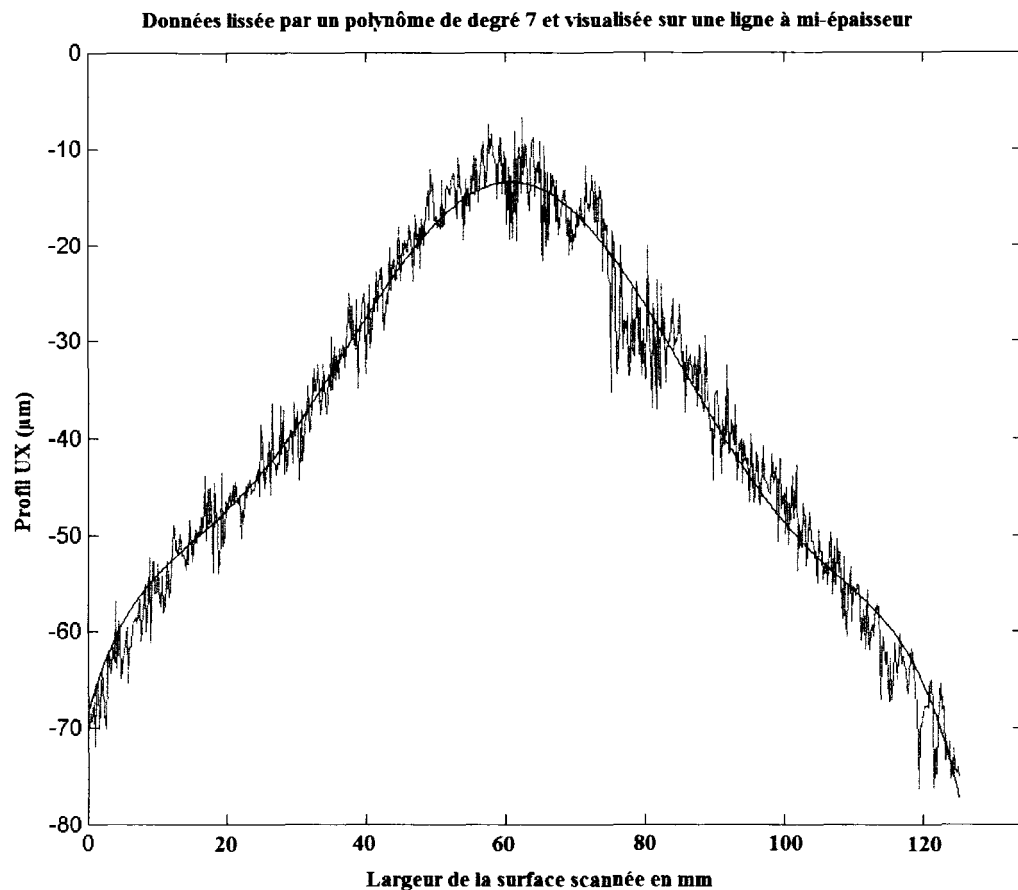


Figure 30 *Résultat sur une ligne du lissage pour une surface analysée.*

Ce qui ressort de cette figure est que le résultat de l'approximation en bleu (ligne continue) est assez fidèle à l'allure du profil déterminé par les points mesurés.

Le programme de l'annexe 2 permet de faire le nivelage, c'est-à-dire la correction de la planéité de la surface mesurée. Il permet également de filtrer et de lisser les valeurs UX obtenues par mesure et d'écrire un fichier texte « coefpol.txt » qui contient les coefficients du polynôme d'approximation de la surface dont le nombre dépend du degré du polynôme choisi.

2.4.3 Calcul numérique des contraintes

La méthode utilisée pour le calcul numérique des contraintes est basée sur la méthode des éléments finis. La méthode numérique de calcul par éléments finis est utilisée pour évaluer les contraintes à partir des déplacements imposés sur la surface de coupe. Les déplacements à imposer sont ceux calculés par lissage : la fonction polynomiale approximative, déterminée par les moindres carrés, évalue la valeur du déplacement en z en chaque nœud en fonction de ses coordonnées en z et y . Une représentation par éléments finis de la plaque soudée est effectuée à l'aide d'un pré-processeur. Le modèle doit respecter exactement les mêmes dimensions en surface que la pièce réelle en longueur et en largeur, et les éléments doivent être uniformes. Selon x .

Les éléments du modèle, de type hexaédrique à huit nœuds avec trois degrés de libertés en chaque nœud (SOLID 45 dans Ansys), présente un pas variable de sorte à économiser le nombre total de nœuds du modèle, comme on peut le voir à la figure 31.

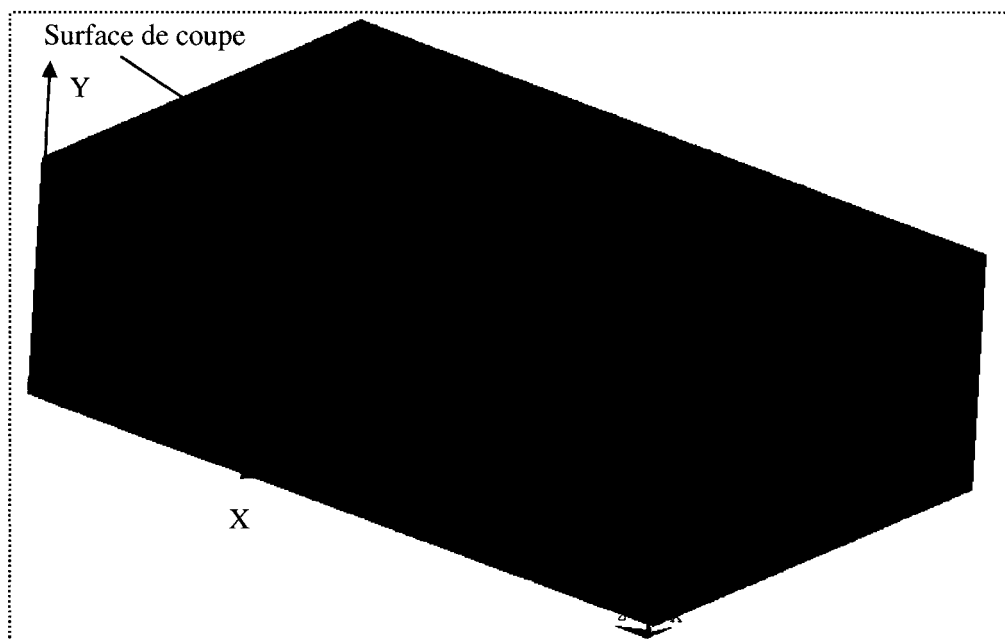


Figure 31 *Modèle pour le calcul numérique.*

À l'aide du modèle d'éléments finis statique linéaire élastique, on solutionne les déplacements aux nœuds ainsi que les contraintes en imposant les déplacements traités du profilomètre, préalablement approximés aux nœuds du modèle. Ces déplacements sont importés dans le moteur de calcul comme des conditions frontières en X. Des conditions frontières de blocage sont rajoutées (figure 32), soit trois blocages sur deux nœuds de coin du modèle, c'est-à-dire deux blocages en Z et Y sur le premier nœud du modèle et un blocage en Z sur le second. Ces conditions bloquent les mouvements du corps rigide tout en permettant les rotations libres.

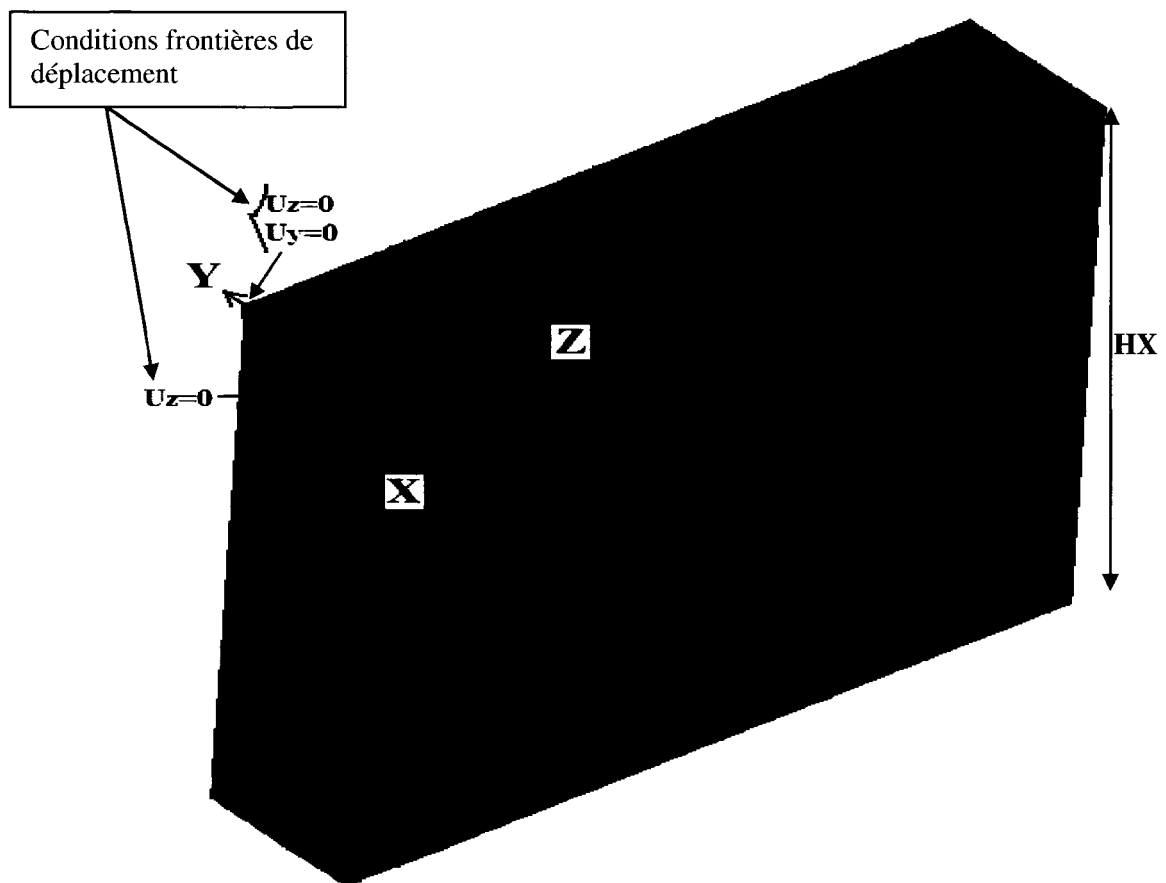


Figure 32 *Modèle géométrique avec conditions frontières*

Pour le calcul des contraintes dues au soudage ou au soudage martelage, les déplacements mesurés par micro-profil de surface après découpage à l'EDM puis filtrage et lissage, sont imposés aux nœuds du modèle en x. la méthode des éléments finis est utilisée pour solutionner le modèle, i.e. les contraintes sont évaluées. D'autres calculs sont alors entrepris avec diverses hauteurs HX d'un modèle plus grand. Si le résultat des contraintes montre un changement par rapport à la solution précédente, la hauteur du modèle est augmentée jusqu'à ce que le résultat ne change plus. À ce moment, la hauteur du modèle est suffisamment grande pour que le niveau de contraintes soit relaxé à 0 à sa base. Lorsque cette convergence est atteinte, puisque cette hauteur est le résultat d'une convergence des contraintes relative à une certaine hauteur du modèle, tout modèle plus haut donnerait, arrivé à convergence, la même solution. Ainsi la hauteur additionnelle devenant des éléments de base en excès demeurant non contraints et non déformés. Le modèle final, montré à la figure 32, pour lequel la convergence est atteinte comporte 57 500 éléments pour un total de 63 500 nœuds.

CHAPITRE 3

VALIDATION DE LA MÉTHODE DE MICRO-PROFIL SUR UNE PLAQUE SOUDÉE

La procédure de mesure des contraintes résiduelles par la méthode de micro-profil de surface étant établie, pour pouvoir la valider expérimentalement, des mesures de ces contraintes seront entreprises sur des plaques assemblées par le procédé de soudage. Ce procédé est reconnu pour induire des contraintes internes de tension le long du cordon de soudure.

Le même type de préparation est respecté pour l'ensemble des échantillons pour éviter son effet sur les résultats finaux des contraintes mesurées, comme l'expliquent Veiga et al [15] dans leur article.

3.1 Préparation des échantillons

Ainsi, deux plaques en acier au carbone A516, numérotées 1 et 2 sont utilisées pour y induire des contraintes résiduelles de soudage. Une préparation en V a été effectuée au préalable sur chacun des échantillons. Cette préparation est non débouchante afin d'éviter d'avoir éventuellement à maintenir les deux parties de la même plaque lors des manipulations avant et durant le soudage (voir figure 33).

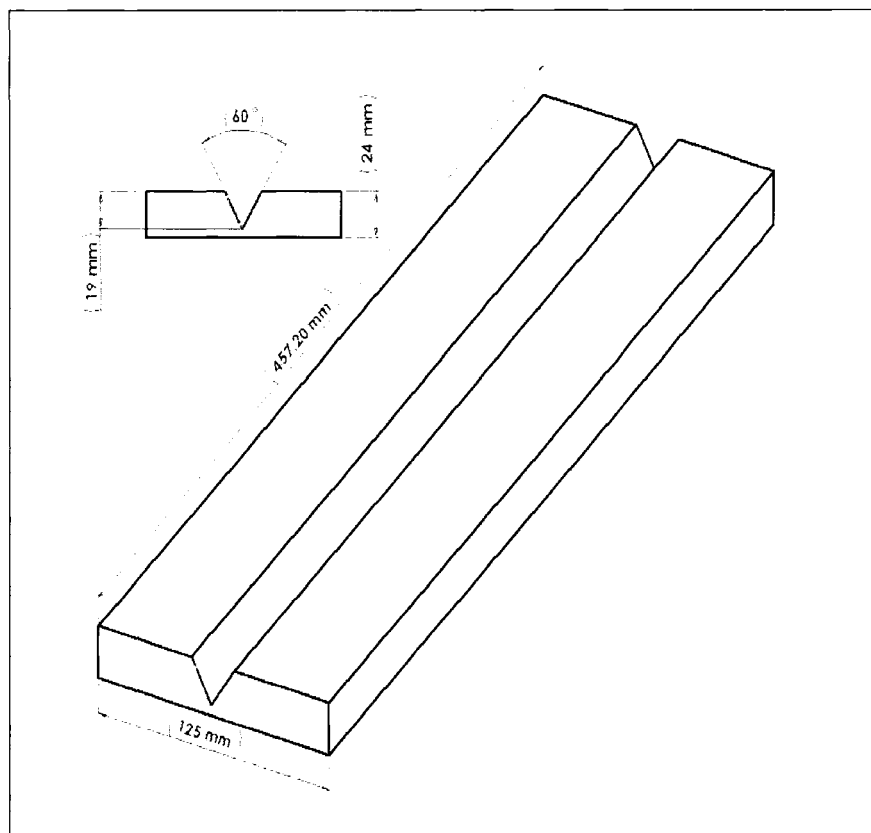


Figure 33 *Préparation avant soudage de la plaque en acier A516.*

Il est à noter que les deux échantillons sont prélevés d'une même plaque initiale. En effet, une plaque initiale, ayant deux fois la largeur de l'échantillon final, est coupée en deux pour donner les deux plaques 1 et 2 qui serviront pour la partie expérimentale, où l'effet du soudage sera étudié.

3.2 Paramètres de soudage

Sur les deux plaques, un dépôt de soudure par procédé MIG robotisé est élaboré de telle manière qu'il ne fasse pas de bourrelet (la matière du métal d'apport ne dépasse pas la surface supérieure sur laquelle la soudure est élaborée), évitant ainsi de mesurer au

profilomètre une surface irrégulière et de modéliser par éléments finis ce dépassement de matière en surface. Le fait d'exécuter le soudage par robot, nous assure une reproduction exacte de cette opération et ainsi les contraintes induites dans les différents échantillons seront les plus identiques que possible. Les paramètres de soudage, qui ont été utilisés, figurent sur le tableau IV.

Tableau IV

Paramètre de soudage

Vitesse (mm/s)	Oscill. (mm)	Courant (A)	Voltage (V)	Énergie linéaire de soudage (kJ/mm)	Vitesse de dévidage (kg/h)
26.4 – 32.0	0 – 2.2	264	29.1	1.4 – 1.8	7.24

Ces paramètres sont choisis dans ce cas précis pour l'unique raison de combler l'espace vide (de la préparation en V) au complet et en une seule passe (voir figure 34). Ces paramètres sont fixés après avoir effectué des essais sur une tierce plaque permettant d'atteindre le résultat voulu.

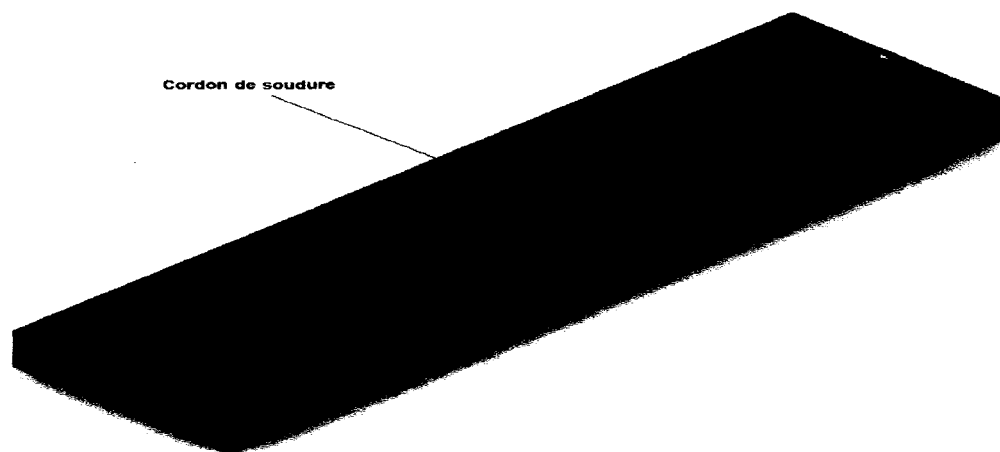


Figure 34 *Dépôt de soudure sur les plaques avec préparation initiale.*

Ce chapitre présente les résultats des méthodes expérimentales, quoique ponctuelles, utilisées à titre de comparaison avec les résultats des contraintes obtenus par la méthode de micro-profil de surface décrite antérieurement. Les contraintes seront évaluées par ces différentes méthodes et seront confrontées entre elles. D'après les résultats obtenus, nous pourrons ainsi faire des commentaires et tirer les conclusions sur la pertinence de la méthode de micro-profil.

3.3 Mesure des contraintes sur la première plaque

Le résultat du calcul numérique par éléments finis, qui donne les contraintes à partir des déplacements mesurés par micro-profil, doit être corroboré par d'autres méthodes usuelles de mesure. La méthode sacrificielle traditionnelle basée sur la réponse ponctuelle de jauges de déformation (avant et après coupe EDM) ainsi que la méthode du perçage d'un trou au centre d'une rosette sont utilisées à cette fin. Pour le cas de la seconde plaque, des mesures XRD sont également effectuées en plus de la méthode de perçage.

3.3.1 Mesure des contraintes par la méthode des jauges bi-axiales

Il existe différents types de jauges de déformation. Nous avons opté pour l'utilisation de jauges de déformation bi-axiales (2 directions à 90°) et non de rosettes du fait que nous avons supposé, ce qui s'est avéré faux, que les contraintes principales se trouvaient selon les directions X (direction longitudinale au soudage) et Y (direction transversale), et ne donnant lieu à aucun cisaillement dans ce système de mesure.

Une jauge bi-axiale, portant l'identification CEA-06-062WT-350 du manufacturier M&M, est collée sur le cordon de soudure d'une des plaques non martelée. Deux autres jauges sont placées de part et d'autre de celui-ci pour vérifier l'éventuelle symétrie entre les valeurs des contraintes par rapport à la ligne centrale de la soudure. Trois autres jauges sont collées vis-à-vis de ces trois premières, de l'autre côté de la future ligne de coupe pour obtenir une confirmation des valeurs obtenues sur les jauges du premier côté (figure 35). Cette préparation permet de vérifier ponctuellement et en surface la méthode basée sur le micro-profil d'une surface de coupe.

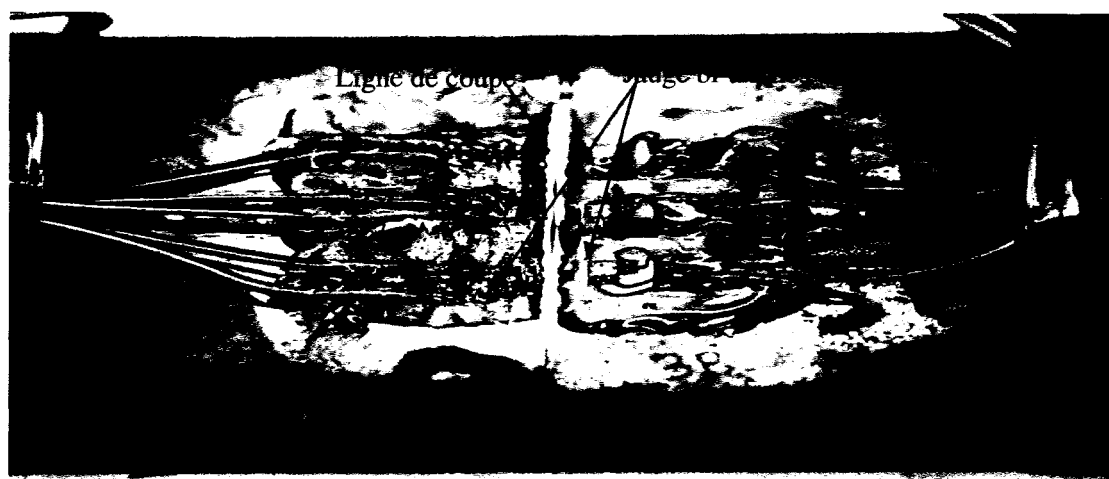


Figure 35 *Plaque en acier 516 soudée avec jauges de déformation.*

Les valeurs des jauges sont mesurées à l'aide d'une boîte d'alimentation et de mesure de sortie de ponts de jauges «Vishay P-3500». La mesure est prise avant la coupe pour établir

une référence, et après la coupe pour obtenir la différence des deux mesures. Ces différences de déformation ont le signe inverse de la contrainte : une augmentation de la déformation représente une contrainte résiduelle de compression alors qu'une diminution de la déformation est l'indice d'une contrainte résiduelle de tension. Appliquant la loi de Hooke générale 3D à un état plan de contrainte ($\sigma_z = 0$), on obtient ainsi une relation pour la déformation en Z. Après substitution de cette déformation dans la loi originale, et après simplification, on obtient la loi de Hooke 2D, qui nous sert ici pour le calcul des valeurs de la contrainte finale.

La loi de Hooke Générale 3D est donnée par :

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \quad (3-1)$$

La déformation selon z pour un état plan de contrainte ($\sigma_z=0$) est donnée par :

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{1-\nu} \quad (3-2)$$

On obtient donc par substitution de l'équation (3-2) dans l'équation (3-1) :

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} [\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y] \quad (3-3)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} [\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x] \quad (3-4)$$

Les valeurs des déformations obtenues et des contraintes (à partir des équations (3.3) et (3.4)) sont regroupées dans le tableau V. les valeurs des contraintes calculées sont représentées à la figure 36, où nous désignons le numéro des jauges et leurs emplacements

sur la plaque en acier. Les lettres X et Y désignent la direction selon laquelle sont orientées les jauges.

Tableau V

Résultats des mesures des déformations et valeurs des contraintes

E=210 GPa $\nu=0.3$

# jauge	mes1	mes2	moyenne	mes1	mes2	moyenne	#ce des moyennes	σ_x	σ_y
1A1Y	567	567	567	179	177	178	389	18	87
1A2X	-248	-248	-248	-207	-208	-207,5	-40,5		
1A3Y	-171	-170	-170,5	256	256	256	-426,5	411	34
1A4X	-30	-29	-29,5	-1939	-1939	-1939	1909,5		
1A5Y	-861	-862	-861,5	-770	-770	-770	-91,5	446	115
1A6X	-334	-335	-334,5	-2296	-2296	-2296	1961,5		
1B7Y	-136	-136	-136	-954	-954	-954	818	-6	170
1B8X	-62	-62	-62	211	211	211	-273		
1B9Y	-305	-305	-305	-514	-513	-513,5	208,5	411	167
1B10X	268	268	268	-1449	-1449	-1449	1717		
1B11Y	127	127	127	-142	-143	-142,5	269,5	454	193
1B12X	-172	-172	-172	-2058	-2058	-2058	1886		

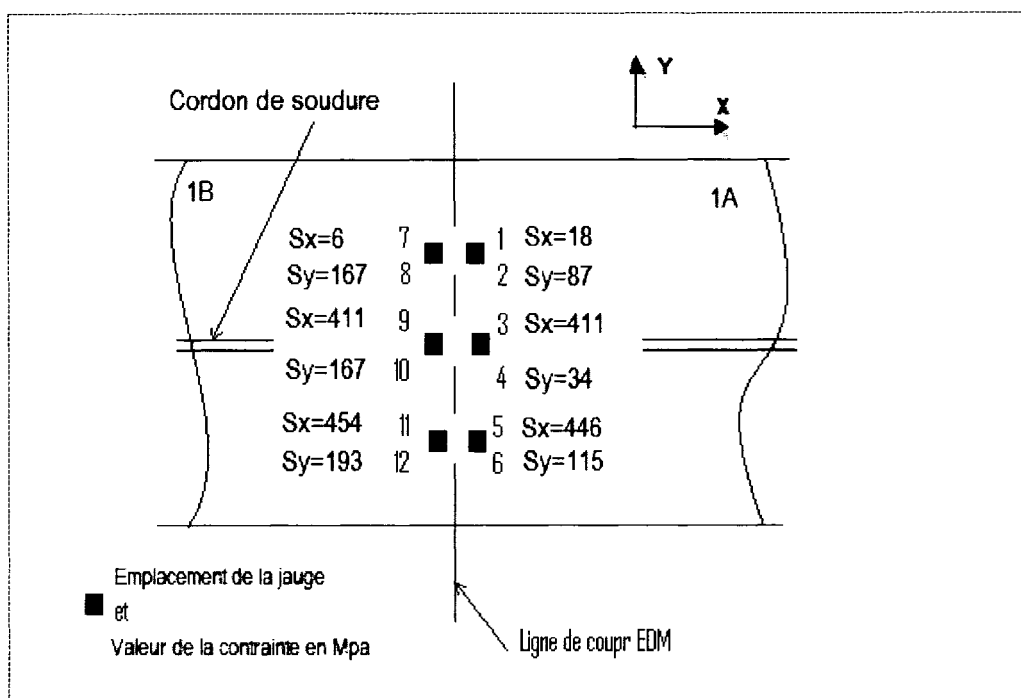


Figure 36 Contraintes expérimentales obtenues par jauges sur la plaque 1.

Les valeurs des contraintes longitudinales suivant la direction axiale (X), comme nous pouvons le voir, sont pratiquement symétriques par rapport à la ligne de coupe ou assez proches pour les considérer égales (jauges 3 et 9 ou 11 et 5). Cependant, nous constatons que cette symétrie n'est pas respectée quand nous comparons les valeurs des contraintes obtenues de part et d'autre du cordon de soudure, comme par exemple la jauge 1 et 5 sur la figure 36.

L'hypothèse la plus plausible qui expliquerait cette différence pourrait être résumée dans le fait que les contraintes les plus faibles se trouvent là où la plaque a été coupée en dernier lieu par le fil de l'EDM. À ce moment de la coupe, la jauge a vu une déformation plastique de l'acier, et à la fin de la découpe, la déformation lue est celle du retour élastique. On pense donc qu'après que le fil de coupe ait atteint la moitié de la plaque lors de la coupe, les contraintes se sont redistribuées dans le ligament de surface qui n'était pas encore entamé, ce qui a provoqué la plastification de cette zone et ainsi les jauges affichent les plus faibles

déformations. Ce phénomène serait dû à un bridage inadéquat de la plaque lors de la coupe à l'EDM, ce que nous allons vérifier et valider plus loin lors de la coupe de la plaque 2.

Les valeurs des contraintes résiduelles transversales (suivant l'axe y) sont très légèrement comparables (jauges 8 et 12) par rapport à l'axe de soudage mais ne présentent aucune concordance par rapport à la ligne de coupe.

Ces valeurs de jauges, selon la direction longitudinale, seront confrontées à celles obtenues par la méthode du perçage du trou incrémental, et seront utiles pour la validation des résultats numériques obtenus par micro-profil de surface et pour confirmer ce phénomène de non symétrie des contraintes par rapport au centre de la soudure.

3.3.2 Mesure des contraintes par la méthode du RS200

Toujours sur la plaque 1, on va maintenant déterminer les contraintes en utilisant la méthode du perçage. Les rosettes à trois sections de type EA-06-062RE-120 sont utilisées, conjointement avec l'équipement RS200 (hole drilling) (voir VISHAY MEASUREMENTS GROUP [16] et ASTM (1999) [17]). Les rosettes sont disposées de la même façon que les jauges bi-axiales vis-à-vis du cordon de soudure, mais loin de la ligne de coupe EDM pour éviter toute interférences dues à la relaxation des contraintes lors de la coupe (voir figures 37).

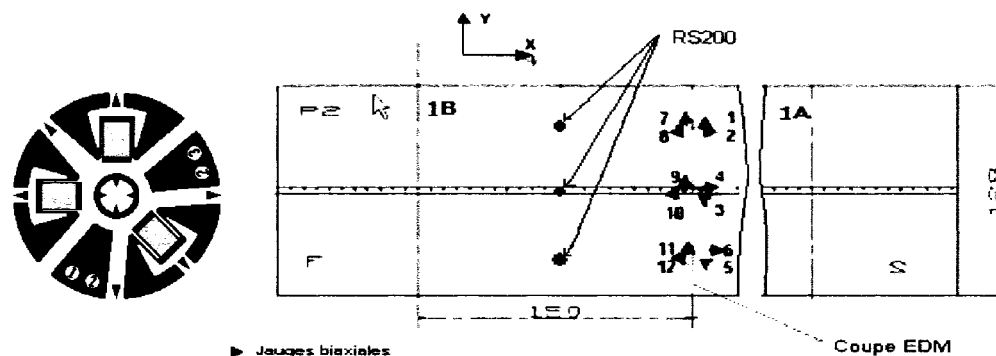


Figure 37 Emplacement des jauges du RS200 sur la plaque 1.

La figure 38 montre l'équipement utilisé pour effectuer le perçage dans la rosette.



Figure 38 *Mesure des contraintes par RS 200 (Hole drilling).*

Les figures 39 et 40 pour la rosette centrale à titre d'exemple nous donne les valeurs de la déformation et de la contrainte en fonction de la profondeur de perçage, soit de zéro à 0.04 po (1.016 mm) (d'après la méthode intégrale introduite et développée par Flaman [18] et Wern [19] qui est préconisée quand le champ de contrainte est non uniforme comme dans le cas de soudage).

La même procédure est utilisée pour traiter les données des deux autres rosettes situées à plus ou moins 20 mm, de part et d'autre du centre de la soudure.

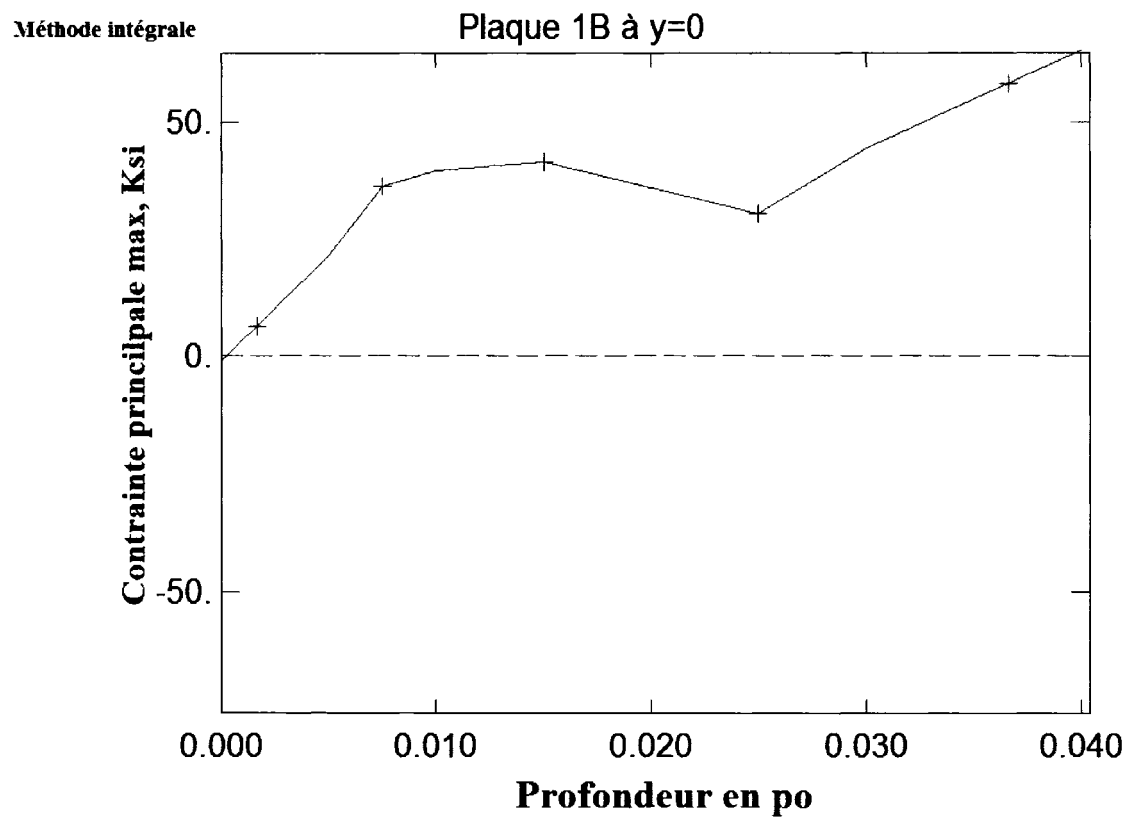


Figure 39 *Contraintes principales mesurées en fonction de la profondeur par la méthode RS200.*

La figure 39 affiche les valeurs de l'une des contraintes principales à travers la profondeur de la plaque associées aux déformations mesurées.

H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION					----- Integral Method						

Plaque 1B à y=0 mesure 2											
Rosette type		= 062 RE			Rosette mean diameter		= 0.202 in				
Young's modulus		= 30.00 psi*10^6			Hole diameter		= 0.0625 in				
Poisson's ratio		= 0.300			Stress depth limit		= 0.040 in				
beta = angle gage 1 clockwise to Smax											

--- Strains ---		90%		----- Stresses -----							
Depth	e1	e2	e3	prob.	Smax	Smin	Tmax	beta	S1	S3	T13
in	ue	ue	ue	bound	ksi	ksi	ksi	deg	ksi	ksi	ksi
.0000	0	0	0								
.0017					6.5	-10.5	8.5	9	6.1	-10.0	-2.7
.0050	-5	-1	7								
.0075					36.2	-15.9	26.1	-1	36.2	-15.9	0.7
.0100	-33	-6	25								
.0150					41.4	-16.7	29.0	-1	41.3	-16.7	0.8
.0200	-110	-20	72								
.0250					30.5	-69.7	50.1	6	29.3	-68.4	-11.1
.0300	-188	-26	170								
.0367					58.2	38.8	9.7	-8	57.9	39.1	2.6
.0400	-237	-44	184								
.0500	-304	-55	217								
.0600	-307	-45	265								
.0810	-287	-31	-335								

Figure 40 Valeurs calculées des contraintes en fonction de la profondeur de perçage.

S_{\max} et S_{\min} désignent les contraintes principales et elles sont décalées de 8° par rapport à l'orientation de la direction 1 de la rosette, c'est à dire par rapport à la direction X de la soudure. Par ailleurs, les contraintes S_1 et S_3 , sur cette même figure, sont les contraintes calculées selon les directions X et Y respectivement. On trouve une contrainte longitudinale (X) de 399 MPa au centre de la plaque, de 176 MPa et 150 MPa pour les deux rosettes situées de part et d'autre (à 20 mm) du centre du cordon de soudure (voir tableau VI).

Dans le centre de la plaque, les directions principales sont confondues avec les axes X et Y. Il n'y a donc pas de cisaillement ou presque, dans le plan de coupe, au centre de la soudure et les contraintes sont approximativement symétriques par rapport au cordon contrairement aux valeurs obtenues des jauges de déformation où l'axe de symétrie se retrouve décalée.

Tableau VI

Valeurs des contraintes obtenues par perçage

Position de la jauge par rapport à la ligne centrale	0 mm	20 mm	-20 mm
Contraintes calculées	399 MPa	176 MPa	150 MPa

3.4 Mesure des contraintes dans la seconde plaque

La plaque 2 est préparée de la même façon que la plaque précédente. Un cordon de soudure est déposé sur l'échantillon comme sur la plaque 1. Les mesures sur la plaque 2 nous permettent, en plus de valider la méthode de mesure, de vérifier également les hypothèses émises lors des mesures obtenues pour la première plaque à cause du bridage.

3.4.1 Mesure des contraintes par la méthode du RS200

Des mesures de contraintes résiduelles, par la méthode du trou incrémental non débouchant RS200, sont faites sur la plaque aux endroits indiqués à la figure 41 par des cercles.

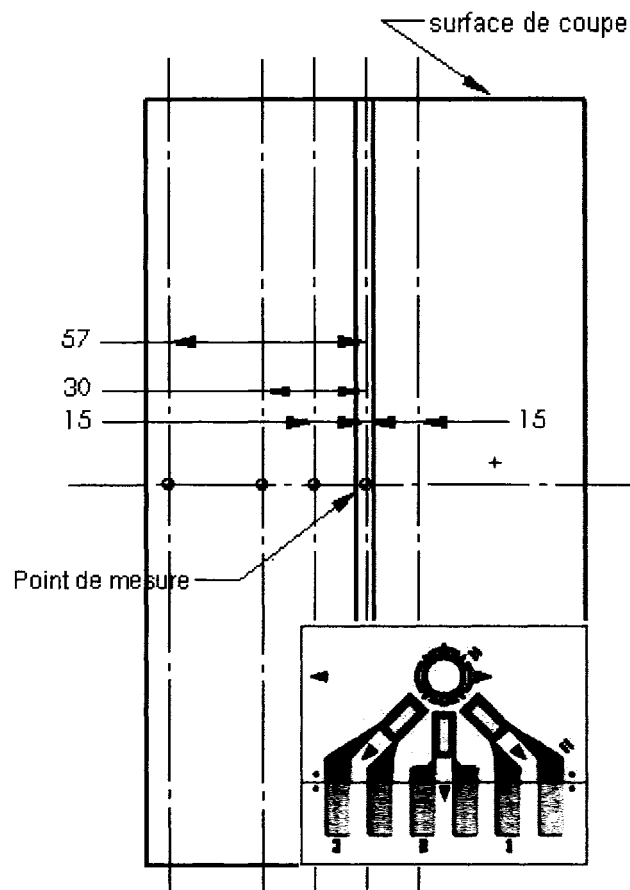


Figure 41 Position des jauges pour les mesures du RS200 sur la plaque 2.

Les résultats de ces mesures de contraintes, obtenues par la méthode du RS200, figurent au tableau VIII, en fonction de leur position. Les rosettes utilisées pour la mesure sont de type CEA-06-062UM-120, dont le schéma est présenté à la figure 41. Comme S1 et S3 de la rosette ne représentent pas les directions transversales et longitudinales de la plaque en fonction du cordon de soudure, la contrainte longitudinale S_x est ainsi calculée à partir des contraintes connues suivant les axes 1 et 3 formant un angle de $\pm 45^\circ$ par rapport à l'axe de la soudure.

Tableau VII

Valeurs calculées des contraintes par RS200 sur la plaque 2

Position de la jauge par rapport au CL (MPa)	-30 mm	-15 mm	0 mm	15 mm
Contrainte : S_1	-121	193	303	158
Contrainte : S_3	-24	246	299	248
Contrainte : S_{13}	107	-71	-369	-82
Contraintes calculées : S_x	34	291	670	285

3.4.2 Mesure des contraintes par la méthode XRD

Sur cette plaque 2, en plus des mesures faites par la méthode du trou, des mesures de contraintes sont également faites par rayons X au centre de la plaque à l'endroit identifié par "Point de mesure" à la figure 41. Les mesures sont faites par un laboratoire externe (PROTO manufacturing Ltd). Les valeurs des contraintes mesurées en ces points sont présentées au tableau IX alors qu'une photo de l'instrumentation de PROTO, utilisée pour la mesure des contraintes par la méthode XRD, est présentée à la figure 42.

Tableau VIII

Valeurs des contraintes longitudinales et transversales en fonction de la profondeur

Profondeur (mm)	Plaque 2	
	Longitudinal Stress (MPa)	Transverse Stress (MPa)
0.000	-18 ± 15	-229 ± 9
0.025	$+106 \pm 10$	$+11 \pm 20$
0.050	$+132 \pm 15$	-115 ± 10
0.100	$+56 \pm 22$	-174 ± 14
0.250	$+107 \pm 23$	-199 ± 16

Les mesures sont faites tout d'abord en surface puis à tous les 0.025 mm jusqu'à une profondeur de 0.1 mm, puis, à une profondeur de 0.25 mm. Pour pouvoir mesurer à ces différentes profondeurs, un polissage électrolytique est effectué à l'endroit de la mesure afin d'atteindre la profondeur voulue.



Figure 42 Équipement utilisé pour la mesure XRD.

3.5 Méthode du micro-profil et comparaison avec les autres méthodes de mesure

À partir du micro-profil de chacune des surfaces de coupe, les déplacements UX, résultats des traitements des données brutes des scans, sont imposés aux nœuds en surface suivant l'axe x d'un modèle par éléments finis représentatif de la plaque et constitué d'éléments de type briques linéaires à huit nœuds. Les calculs par éléments finis sont faits par deux types de logiciels qui aboutissent aux mêmes résultats, soit «modlin» qui est un code maison, et le logiciel ANSYS 9.0 qui est un logiciel commercial. Les résultats des calculs de contraintes, après convergence, sont obtenus pour chacune des deux plaques. On a utilisé un module d'élasticité E et un coefficient de Poisson de 210 GPa et de 0.3 respectivement.

3.5.1 Analyse de contraintes pour la plaque 1

Le champ de contraintes résiduelles de la plaque 1, sur la totalité de la surface de coupe et normal à cette face, après convergence, est représenté à la figure 43.

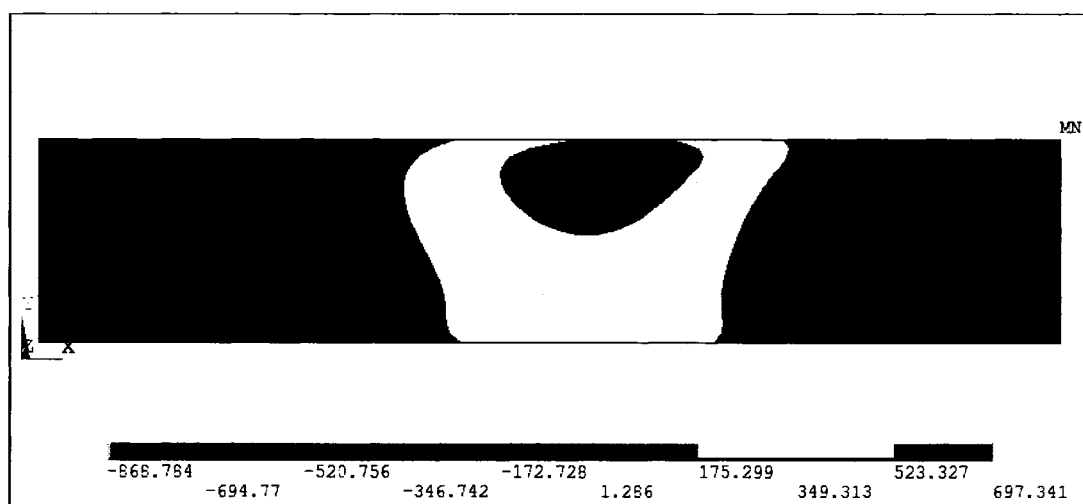


Figure 43 Profil des contraintes résiduelles σ_z sur la plaque 1.

Les résultats des contraintes évaluées par micro-profil montrent que les contraintes les plus élevées se situent approximativement au centre supérieur de la face à l'endroit du dépôt du

cordon de soudure et sa valeur maximale est de 560 MPa. Pour pouvoir comparer ces résultats aux autres méthodes de mesure, nous traçons la valeur de la contrainte aux nœuds en surface du modèle suivant la direction longitudinale (Y) soit sur la largeur de la plaque. Le profil obtenu est présenté à la figure 44.

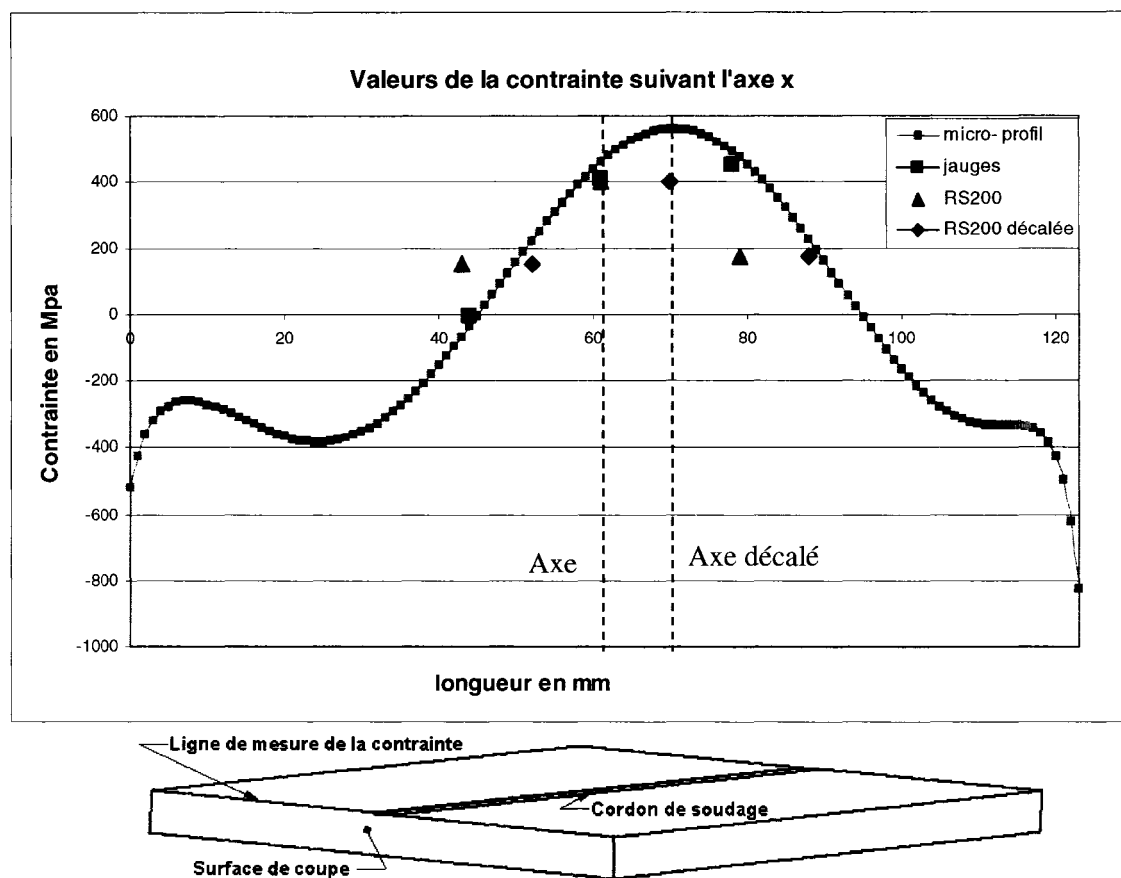


Figure 44 Valeurs de la contrainte résiduelle longitudinale en surface sur la plaque 1

Les contraintes longitudinales évaluées par les deux méthodes (jauges bi-axiales et micro-profil de surface) sont comparables avec une différence n'excédant pas les 40 MPa. Ces deux méthodes donnent une contrainte maximale légèrement décalée par rapport au centre de la plaque, comme cela devrait l'être ; le désaxement étant survenu lors de la coupe EDM, à cause d'un bridage inadéquat.

Les résultats obtenus par les trois méthodes de mesure déjà mentionnées (jauges bi-axiales sacrificielles, rosettes autour d'un trou et micro-profil de surface de coupe) sont ici discutés afin d'évaluer le niveau de confiance de la mesure.

En principe, nous aurions dû obtenir un champ de contraintes longitudinal de soudage symétrique par rapport au cordon, c'est à dire sans décalage comme l'indiquent les valeurs de contraintes calculées à partir des valeurs de déplacements lues par micro-profil. D'ailleurs, les valeurs expérimentales des contraintes obtenues par les rosettes de perçage (RS200) révèlent bien cette symétrie par rapport à ligne de soudage représentée par l'axe de symétrie à la figure 44. Quand ces valeurs, toujours celles obtenues par RS200 et représentées en rouge (losange), sont décalées en les coïncidant avec les valeurs maximales obtenues par les autres méthodes (voir axe décalé de la figure 44), cela montre que les contraintes obtenues par micro-profil ont la même allure et sont comparables.

L'hypothèse que nous retenons pour expliquer ce décalage est, qu'au moment de la coupe à l'EDM, la partie de la surface encore en contact lors de la coupe se plastifie graduellement à cause de la re-localisation des contraintes sur un ligament plus faible au fur et à mesure que la coupe progresse. En effet, cette hypothèse est soutenue par les mesures obtenues par jauges bi-axiales placées au préalable de part et d'autre de la ligne de coupe, qui d'ailleurs ont vu les mêmes déformations dues aux relaxations que nous avons mesurées avec le profilomètre, tandis que celle mesurées par RS200 loin de la ligne de coupe respectent cette symétrie.

L'asymétrie du profil de contraintes par rapport au cordon de soudure pourrait résulter d'une plastification due à la coupe, ce qui nous incite à nous poser des questions sur la façon de maintenir la plaque fermement durant la coupe.

Pour écarter tout doute sur la mesure des contraintes résiduelles par la méthode de micro-profil, nous allons procéder à d'autres coupes EDM avec une méthodologie de coupe et de bridage différente de celle utilisée jusqu'à maintenant pour la plaque 1, en faisant traverser le fil de coupe non d'un bord à l'autre mais plutôt d'une surface vers l'autre et de préférence la coupe entame la surface où il est supposé y avoir les contraintes les plus

élevées. Ainsi, la relaxation des contraintes se fera d'une façon symétrique part rapport au cordon de soudage.

3.5.2 Analyse des contraintes pour la plaque 2

La plaque 2 est préparée d'une façon semblable à la plaque 1, après une coupe EDM respectant les recommandations précédentes, c-à-dire que la coupe EDM part de la surface supérieure vers la surface inférieure, les déplacements en surface sont mesurés et traités, suivant la procédure adoptée pour le calcul des contraintes par micro-profil. Le profil de contrainte en surface, évalué par éléments finis, est présenté à la figure 45.

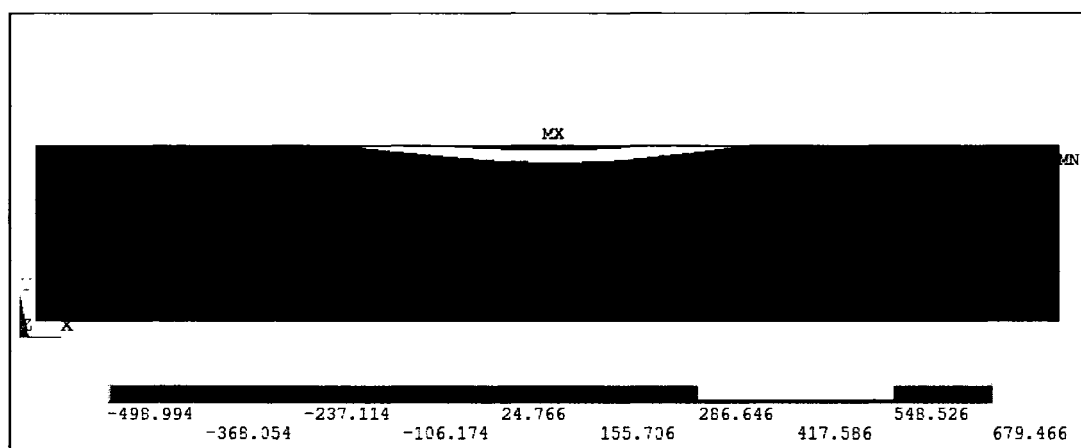


Figure 45 *Profil des contraintes résiduelles sur la plaque 2.*

La distribution des contraintes, d'après le profil ci-dessus, répond parfaitement à celle d'une préparation soudée. En effet les contraintes maximales en tension, abstraction faite des bords extrêmes de la surface, sont localisées au centre de la plaque à l'endroit du dépôt de soudage à pénétration partielle. La zone en tension, au centre, est encadrée de part et d'autre par des zones en compression.

Afin de comparer les valeurs des contraintes obtenues par les différentes méthodes de mesure, le profil de contrainte en surface sur la largeur de la plaque est tracé à la figure 46.

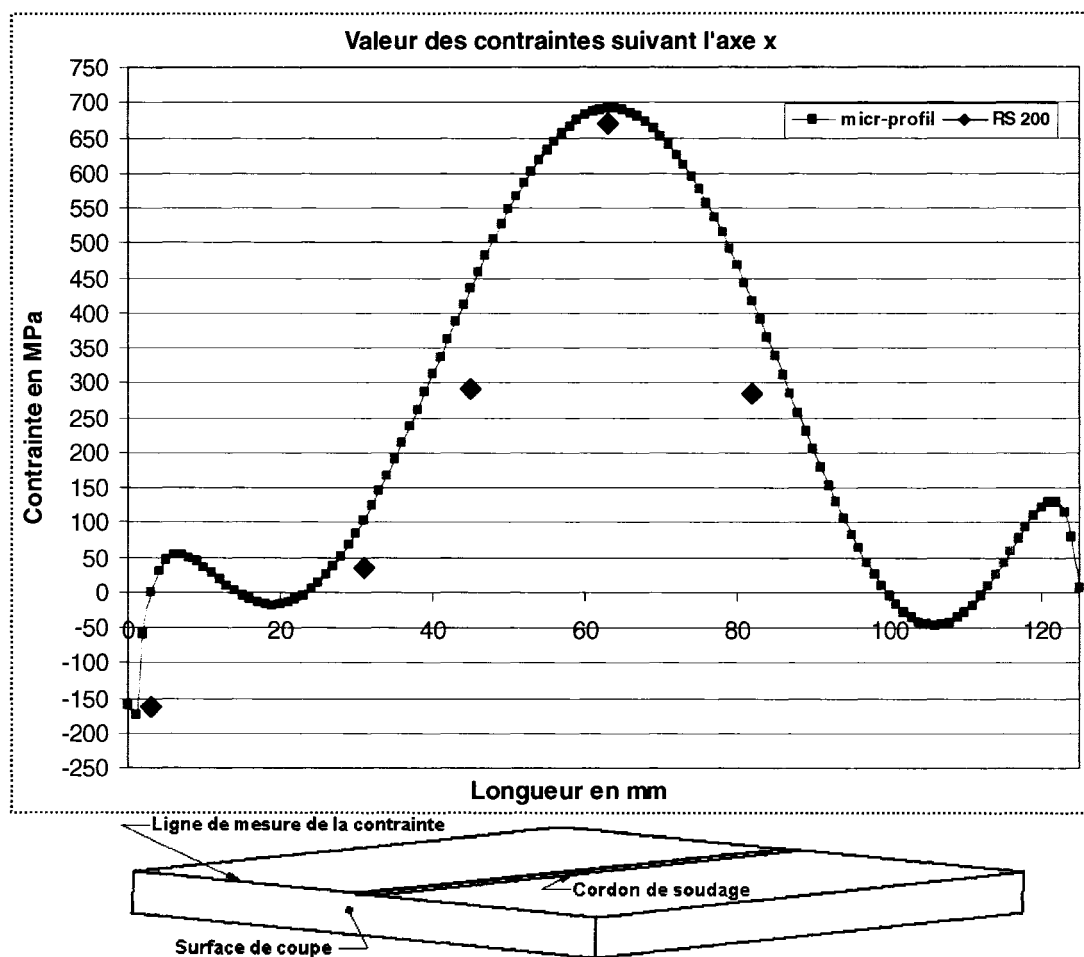


Figure 46 Valeurs de la contrainte résiduelle sur la plaque 2.

Les contraintes résiduelles sont cette fois ci symétriques par rapport au centre de la plaque, contrairement aux résultats obtenus sur la plaque 1 et cela a été réalisé en modifiant la trajectoire de coupe. En effet la contrainte maximale se trouve au centre de l'échantillon et cela est valable d'autant plus pour les valeurs obtenues par micro-profil que celles par RS200.

Il est à noter que les contraintes évaluées par ces deux méthodes se suivent en fonction de leur position et elles sont comparables en intensité de part et d'autre de la ligne centrale. Les mesures faites en dehors du centre de la plaque sont sensiblement différentes à celles obtenues par calcul à cause de l'incertitude de chacune des deux méthodes de mesure. En ce qui concerne la valeur de la contrainte au centre de la plaque, quoique élevée pour les deux méthodes, celle mesurée par RS200 atteint 670 MPa qui est très proche de la valeur obtenue par micro-profil de 679 MPa. Cela est très satisfaisant. La valeur de la contrainte de compression à l'extrémité gauche de la plaque évaluée par micro-profil aussi été validée par RS200, ce qui confirme que la contrainte au bord ne retombe pas forcément à zéro et ceci à cause de divers paramètres tels les dimensions de la plaque ou l'intensité de l'énergie de soudage.

Finalement toutes ces comparaisons ne font que valider notre méthode de mesure. Elles démontrent que la procédure élaborée pour la mesure des contraintes résiduelles par micro-profil est fonctionnelle et qu'elle peut être employée pour la mesure de ces contraintes dans tout assemblage où les contraintes internes font l'objet d'études.

CHAPITRE 4

ÉVALUATION DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DUES AU MARTELAGE SUR UNE PRÉPARATION SOUDÉE

Le martelage mécanique est un des procédés de traitement de surface employé depuis très longtemps pour déformer des pièces à chaud ou à température ambiante pour la mise en forme d'objets à parois minces tels que l'emboutissage. Ce dernier est une méthode de mise en forme très utilisée pour assurer la production en grandes séries. Il est actuellement reconsidéré pour un autre objectif qui est celui d'induire des contraintes résiduelles de compression dans les assemblages soudés. En effet il a été montré que le martelage est favorable à la réduction des contraintes en tension induites par le soudage (Lobanov [21]), ce qui améliorerait considérablement le comportement en fatigue des structures soudées.

Pour mieux comprendre les effets du martelage sur la redistribution des contraintes résiduelles dues au soudage, la mesure de ces contraintes est nécessaire. La mise en place de la méthode de mesure par micro-profil de surface (coupe, mesure, approximation polynomiale et FEM) présentée dans le chapitre précédent, sera l'outil idéal pour étudier ce procédé du fait qu'il permet d'évaluer la contrainte sur toute une surface de coupe.

4.1 Paramètres du martelage

La plaque de ce test, ayant les mêmes dimensions que la plaque 2, est soudée avec les mêmes paramètres de soudage présentés dans le tableau IV au chapitre précédent. Elle a subi un martelage robotisé à l'aide du robot «Scompi». Un marteau pneumatique est monté sur le bras du robot «Scompi» qui permet ainsi de contrôler la trajectoire du marteau selon deux directions. Ce procédé de martelage a été récemment mis au point par l'institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) pour la réparation des turbines hydrauliques. La figure 47 présente le robot en question où un marteau pneumatique est monté sur un bras articulé.

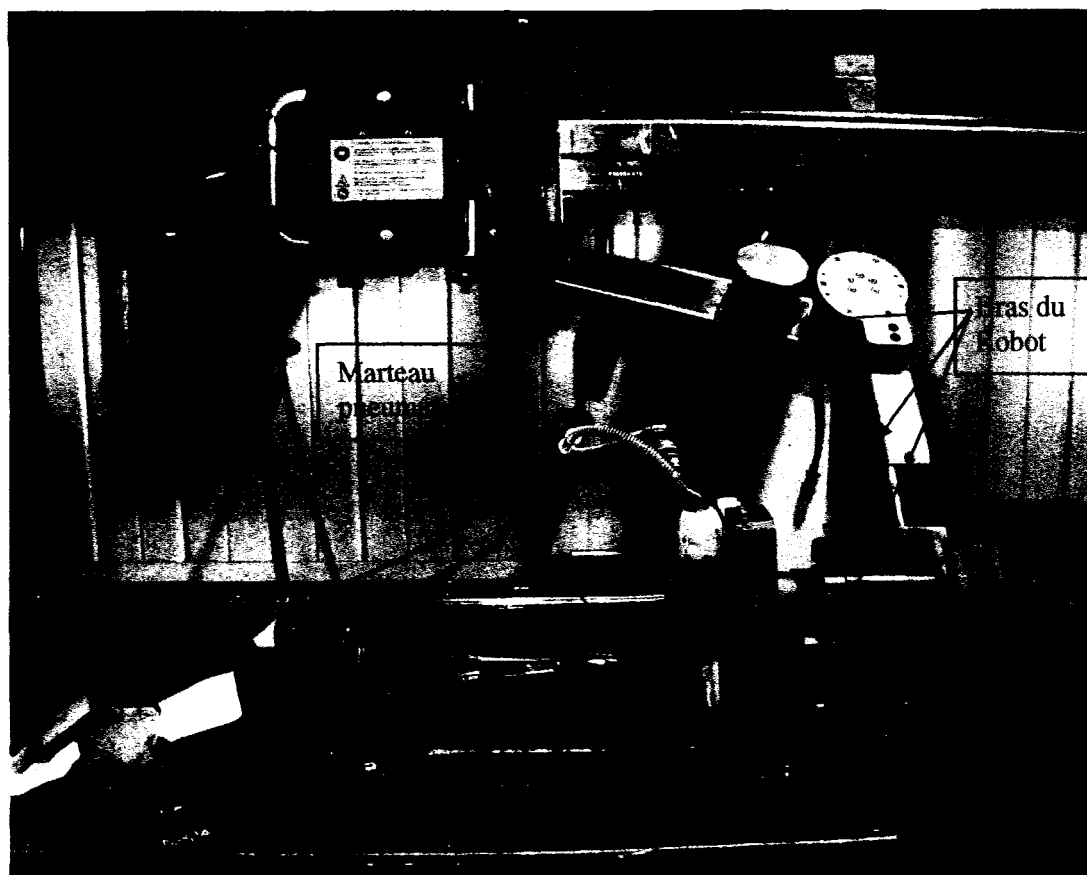


Figure 47 Robot «Scompi» utilisé pour le martelage

Les paramètres de martelage utilisés pour l'exécution de ce traitement de surface présentés au tableau V sont ceux les plus couramment employés lors de la maintenance de turbines et. Lorsqu'un de ces paramètres est changé, il est certain que le résultat du champ de contraintes obtenu sera différent.

Tableau IX

Paramètre de martelage

No. Cycle martelage	Energie par impact (J)	Freq impact (Hz)	Rayon de tête (mm)	Vitesse (mm/s)	Osc. Ampl. (mm)	Force normale (N)	Pression pneumatique (psi)	Energie linéique du martelage (J/mm)
1	6	36	12.5	3-6	1-7	105	90	36-72

Le martelage de la plaque, préalablement soudée, ne couvre qu'une zone partielle de la surface. Cette zone de 36 mm de largeur s'étale sur tout le long de la plaque et englobe ainsi toute la zone affectée thermiquement (ZAT). Il est supposé que le champ de contraintes à cet endroit est le plus élevé et nous allons par ce traitement voir l'effet que pourrait produire ce procédé de traitement de surface sur la distribution des contraintes générées à l'étape du soudage.

4.2 Mesure des contraintes dans la plaque martelée

Le martelage de la plaque se fait le long du cordon de soudure et il est limité sur une zone de 18 mm de part et d'autre de la soudure (voir figure 48). Cette figure montre l'état de surface final obtenu après les divers impacts du marteau pneumatique et cet aspect est dû à la plastification de la zone travaillée.

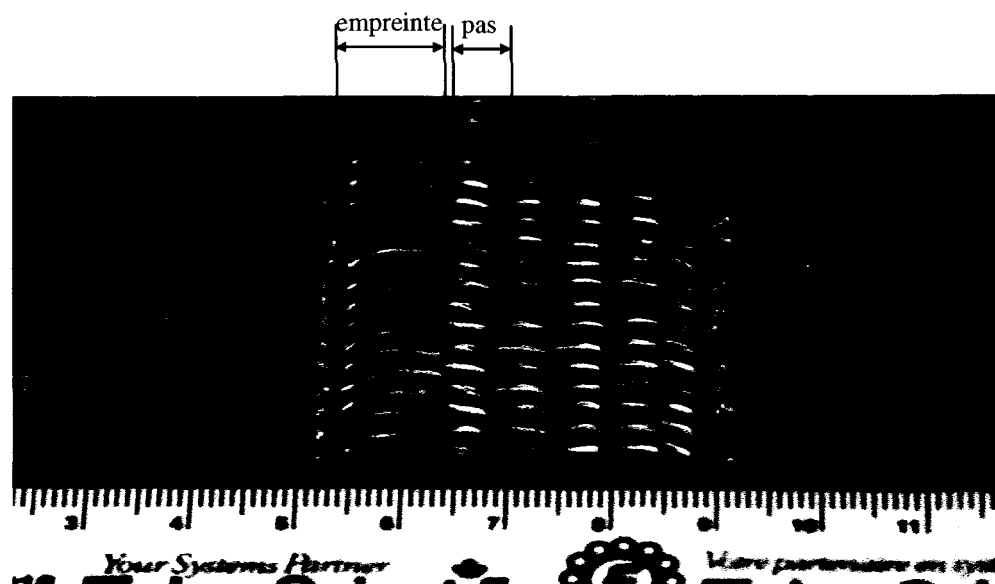


Figure 48 Visualisation du martelage sur la plaque 3.

La zone affectée thermiquement, puis martelée, est supposée emprisonner les contraintes internes en tension les plus élevées. Ce traitement de surface vise à réduire ces contraintes internes localement ou même à les inverser en les ramenant en compression, ce qui pourrait être bénéfique pour certaines utilisations. Nous analyserons également l'effet global du martelage sur les contraintes résiduelles sur une surface entière de coupe (pour voir son effet en profondeur) selon la direction longitudinale par rapport au cordon de soudure suivant laquelle les contraintes sont les plus élevées.

Ainsi, sur la plaque 3, des mesures de contraintes résiduelles sont faites en surface par la méthode du trou (RS200), par la méthode XRD et par micro-profil sur la surface de coupe.

4.2.1 Mesure des contraintes par la méthode RS200

Comme dans les cas précédents, des mesures au RS200 des contraintes résiduelles en surface sont effectuées sur la plaque 3 aux endroits indiqués « points de mesures » à la figure 44.

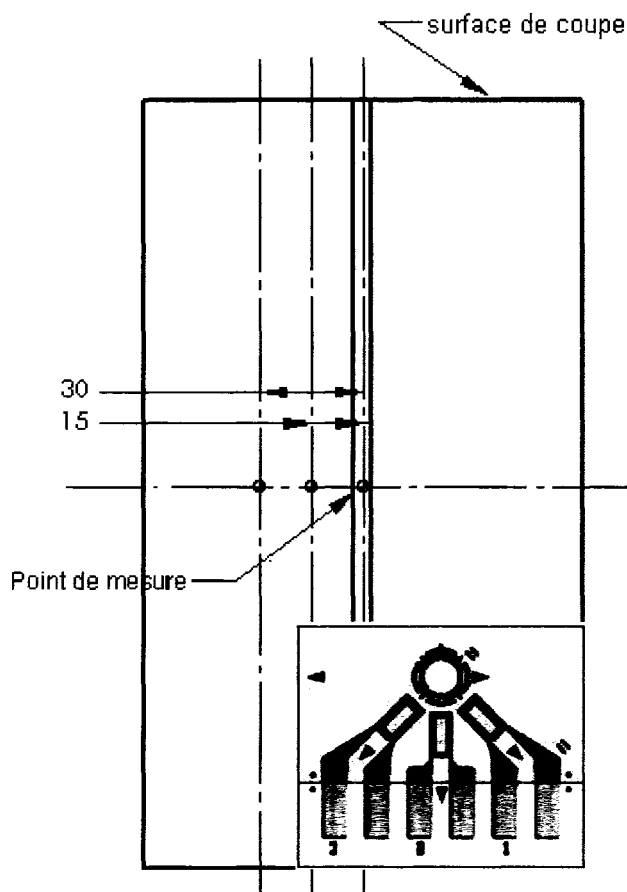


Figure 49 *Position des points de mesures des contraintes au RS200 sur la plaque 3.*

La première mesure est faite au centre de la plaque suivie de deux autres à 15 mm d'intervalle. Les mesures sont faites loin des extrémités pour éviter l'effet de bord sur les contraintes internes. Les résultats obtenus de ces mesures, soient les contraintes S_1 et S_3 selon l'orientation de la rosette, ainsi que la contrainte longitudinale S_x , obtenue à partir de ces deux dernières, sont reportés dans le tableau X.

Tableau X

Valeurs des contraintes résiduelles obtenues par RS200 sur la plaque 3

Position de la jauge par rapport au CL (MPa)	-30 mm	-15 mm	0 mm
Contrainte : S1	-77	-454	-571
Contrainte : S3	107	-26	-120
Contrainte : S13	-70	188	148
Contrainte calculée : S_x	-55	-428	-493

4.2.2 Mesure des contraintes par la méthode XRD

Les mesures aux rayons X sont effectuées au centre de la plaque 3, en un point au centre du cordon de soudure. Les mesures sont faites à différentes profondeurs, avec polissage électrochimique local pour atteindre la profondeur voulue à chaque étape. Les valeurs des contraintes obtenues par XRD pour chaque profondeur sont présentées au tableau XI.

Tableau XI

Contraintes résiduelles obtenues par mesures XRD sur la plaque 3

Profondeur (mm)	P3	
	Contrainte longitudinale (MPa)	Contrainte transversale (MPa)
0.000	-92 ± 10	-266 ± 12
0.025	+126 ± 20	-2 ± 14
0.050	+31 ± 15	-68 ± 12
0.100	-116 ± 24	-182 ± 23
0.250	-400 ± 16	-401 ± 3

4.3 Méthode du micro-profil et comparaison avec les autres méthodes de mesure pour la plaque martelée

Il est important de savoir que le seul moyen de connaître l'état de contraintes dans la plaque 3 est de procéder à des mesures. En effet, on ne peut procéder par la méthode de superposition des contraintes, c'est-à-dire additionner les contraintes dues à chacun des procédés du fait que ces derniers entraînent des déformations plastiques dont nous ne connaissons ni l'amplitude ni l'historique du développement.

Il est pris pour hypothèse que la plaque 3 renfermait des contraintes en tension ayant un profil similaire à celui observé pour la plaque 2 avant martelage. Il est à noter que les deux plaques 2 et 3 ont été prélevées d'une même plaque deux fois plus large, coupée en deux, qui ont été ensuite soudées avec les mêmes paramètres déjà mentionnés. La procédure de soudage des plaques est robotisée dans les deux cas.

Les valeurs des contraintes normales au plan mesurées par la méthode de micro-profil, c'est-à-dire calculées par éléments finis d'après les déplacements mesurés sur les surfaces de coupe de la plaque 3, sont montrées à la figure 50.

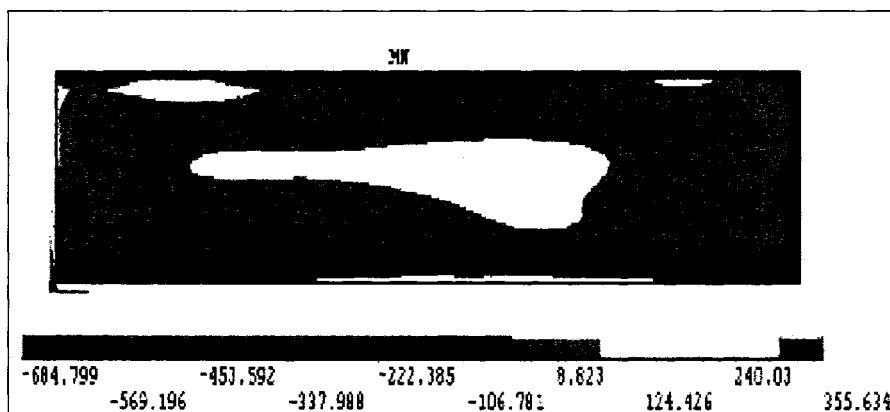


Figure 50 Profil des contraintes résiduelles sur la plaque 3.

Cette figure montre que dans la zone centrale où les contraintes longitudinales étaient en tension avant martelage sont renversées comme prévu. Donc cette méthode de traitement de surface est efficace pour transformer les contraintes de tension en compression à la surface.

Les contraintes calculées par micro-profil sont tracées à la figure 51, qui n'affiche que la première ligne de surface. Ces mesures sont comparables aux autres mesures utilisées pour des fins de validation. En effet, la valeur de la contrainte au centre de l'échantillon, mesurée par XRD est très proche de celle obtenue par micro-profil de surface avec une différence de 14 MPa, tandis que les mesures des contraintes obtenues par RS200 suivent l'allure des valeurs du micro-profil globalement mais sont de 100 MPa plus faibles au centre que ces dernières alors que les valeurs à 30 mm du cordon sont presque égales. Cependant il serait assez difficile de savoir laquelle des deux méthodes est la plus proche de la valeur de la contrainte réelle puisque les deux méthodes XRD et micro-profil se rejoignent.

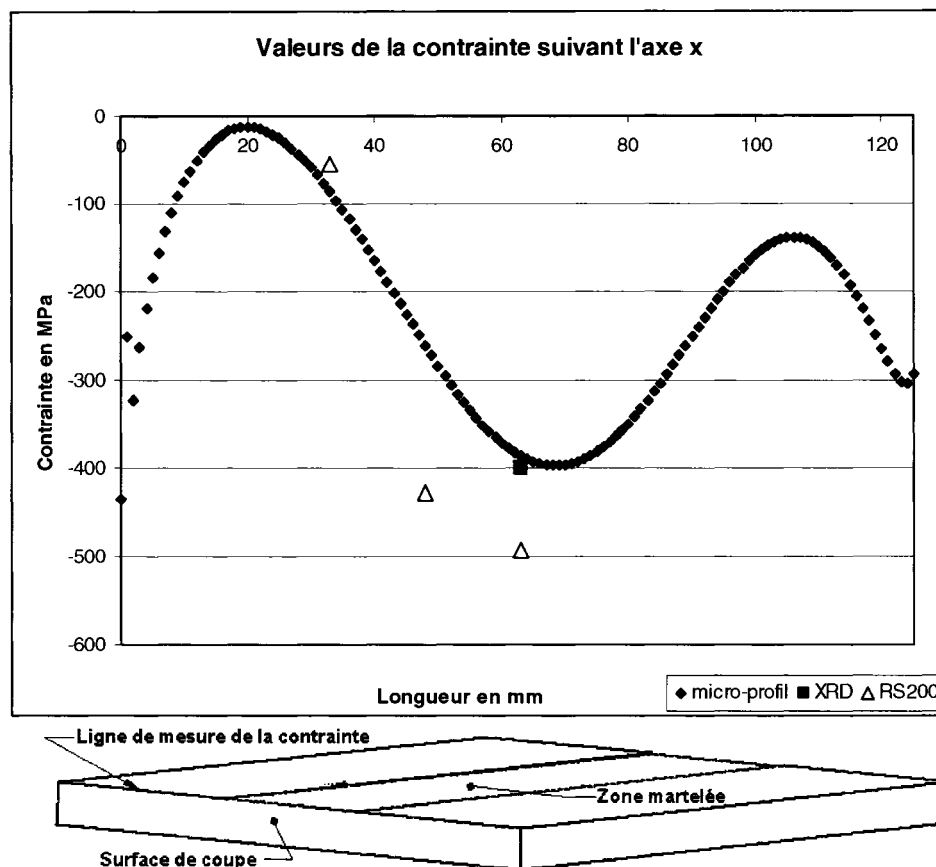


Figure 51 Valeurs de la contrainte résiduelle sur la plaque 3.

D'après ces résultats, on peut confirmer que la méthode de micro-profil est capable d'évaluer les contraintes internes aussi bien en tension qu'en compression et on peut dire que la coupe EDM n'altère pas les mesures des déplacements en surface vu qu'ils coïncident avec au moins une des mesures usuelles (XRD dans le cas présent).

En plus de la validation de la méthode du micro-profil, une attention particulière est portée sur l'effet de ce type de traitement de surface qui est le martelage. De ce fait, il est constaté que le traitement de surface appliqué à la plaque 3, contrairement à toutes les autres méthodes de traitement de surface semblables, a une influence plus importante en profondeur sur l'état de contrainte car cette influence est visible sur la totalité de la plaque en profondeur, tel qu'illustré à la figure 52.

La zone de compression dépasse les 4 mm obtenus par martelage aux ultrasons (De Wald [11]) qui est d'au moins 8 mm où l'effet est majeur dans le cas du martelage mécanique et cet état de contrainte pourrait être encore plus bénéfique pour prolonger la vie en fatigue des pièces.

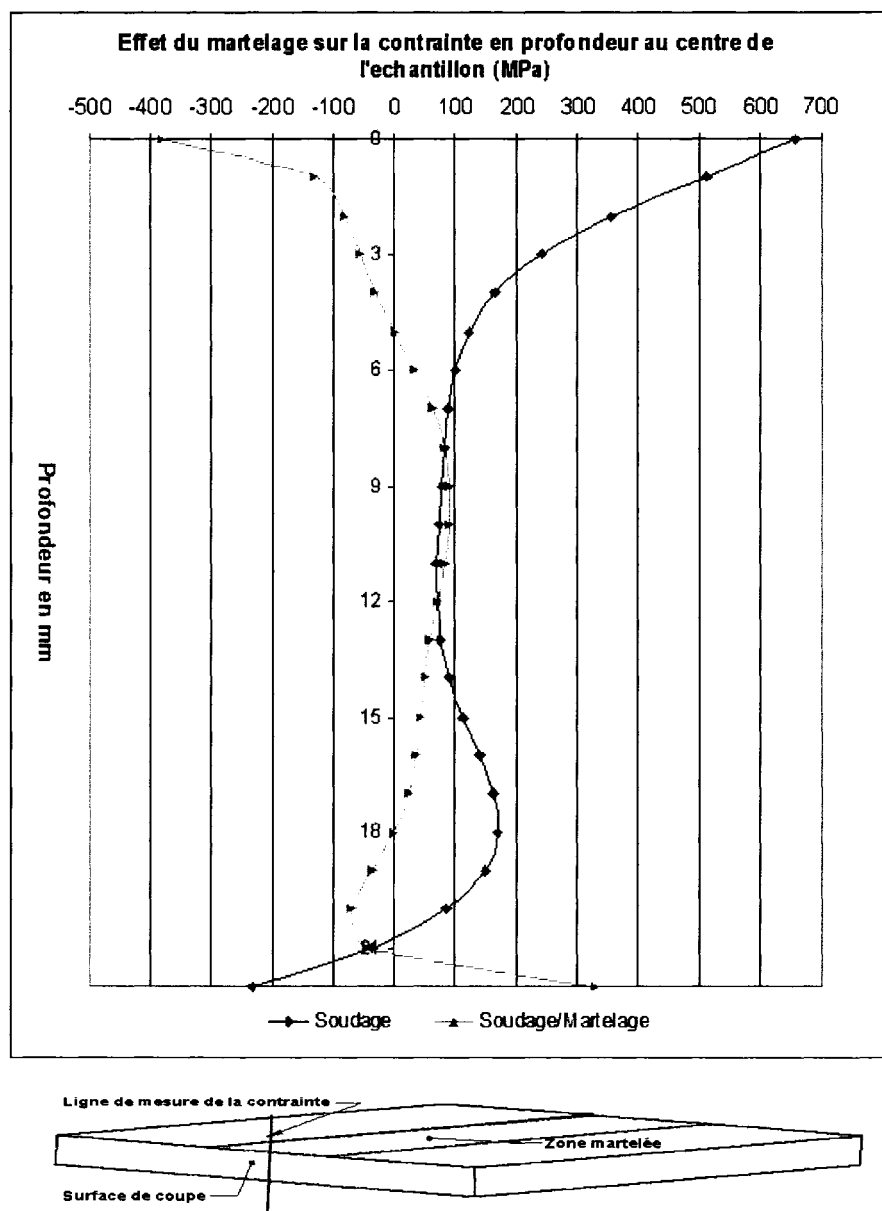
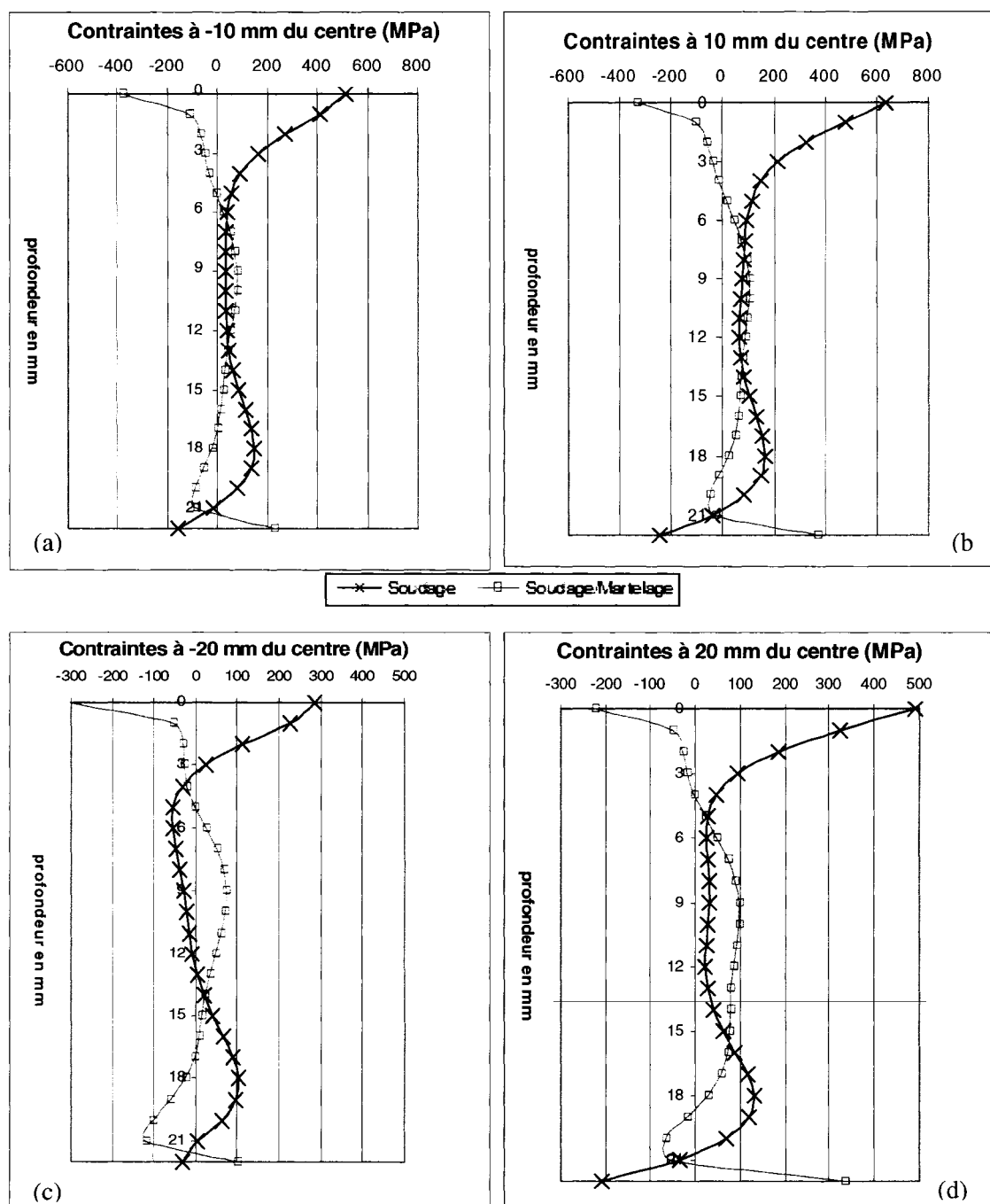
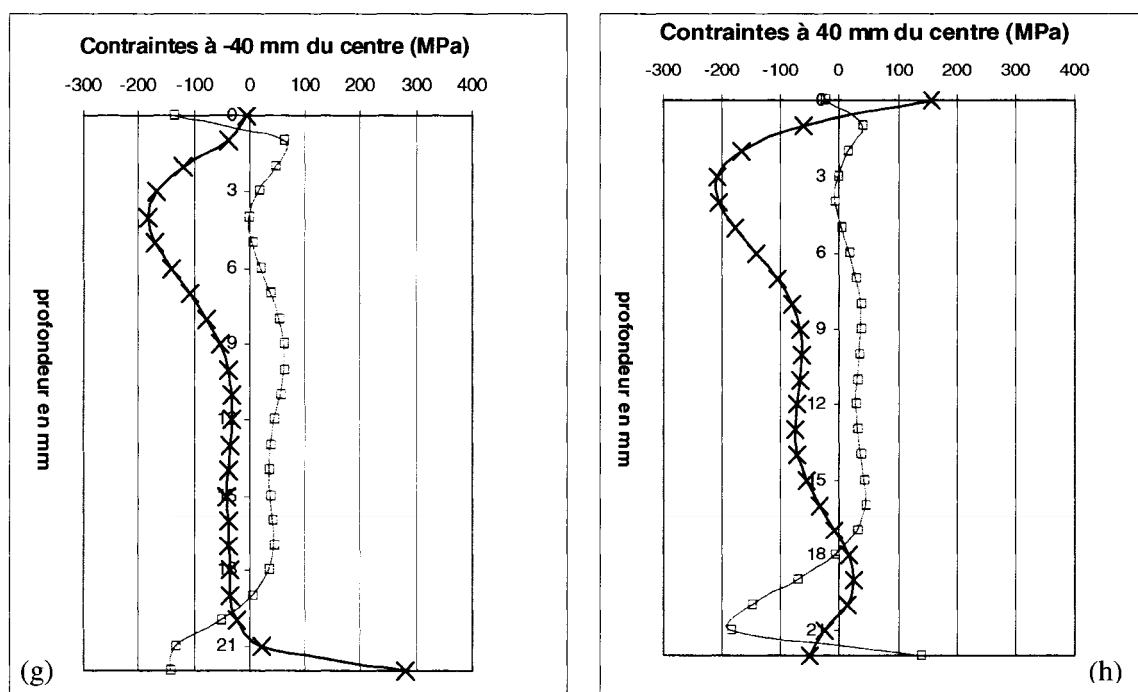
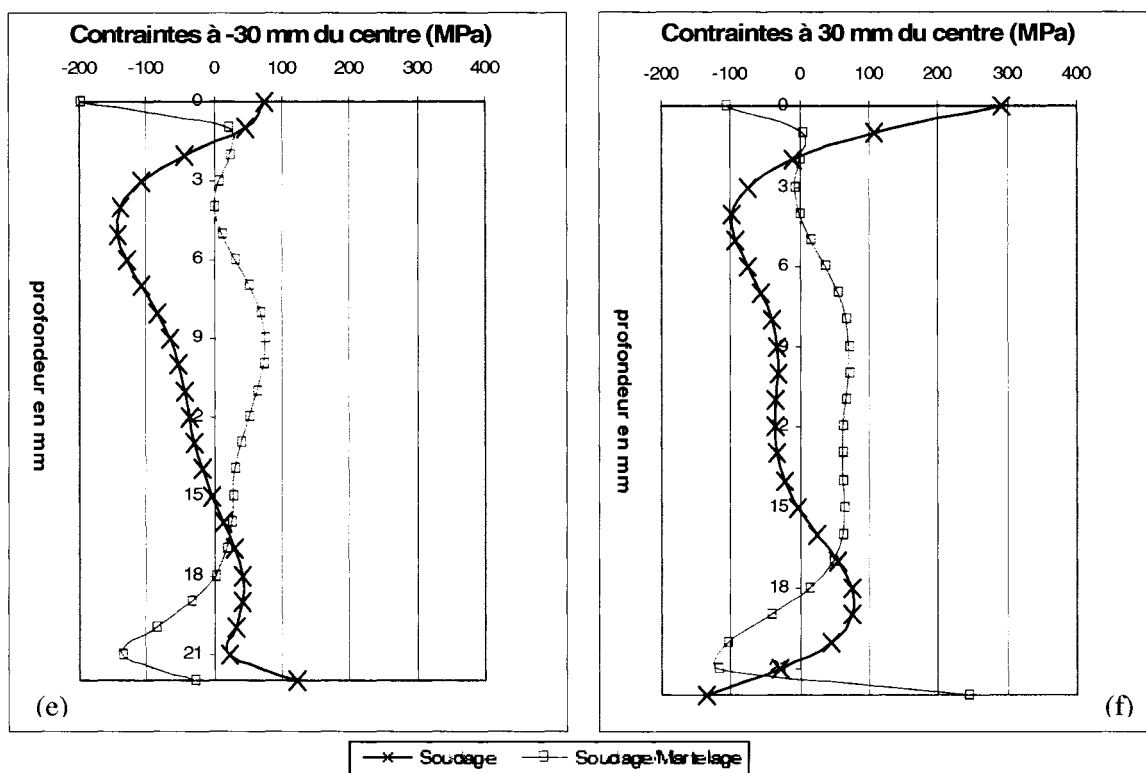


Figure 52 Valeur de la contrainte en profondeur sur les échantillons soudés et soudés martelés.

Le martelage, bien qu'il ne couvre qu'une bande de 18 mm de part et d'autre du cordon de soudure au centre de la plaque, a une influence plus large sur la répartition de la contrainte, du fait que même à 50 mm (voir figure 53 (i et j)) de l'axe central de la plaque, nous observons toujours son effet sur les contraintes déjà en présence.





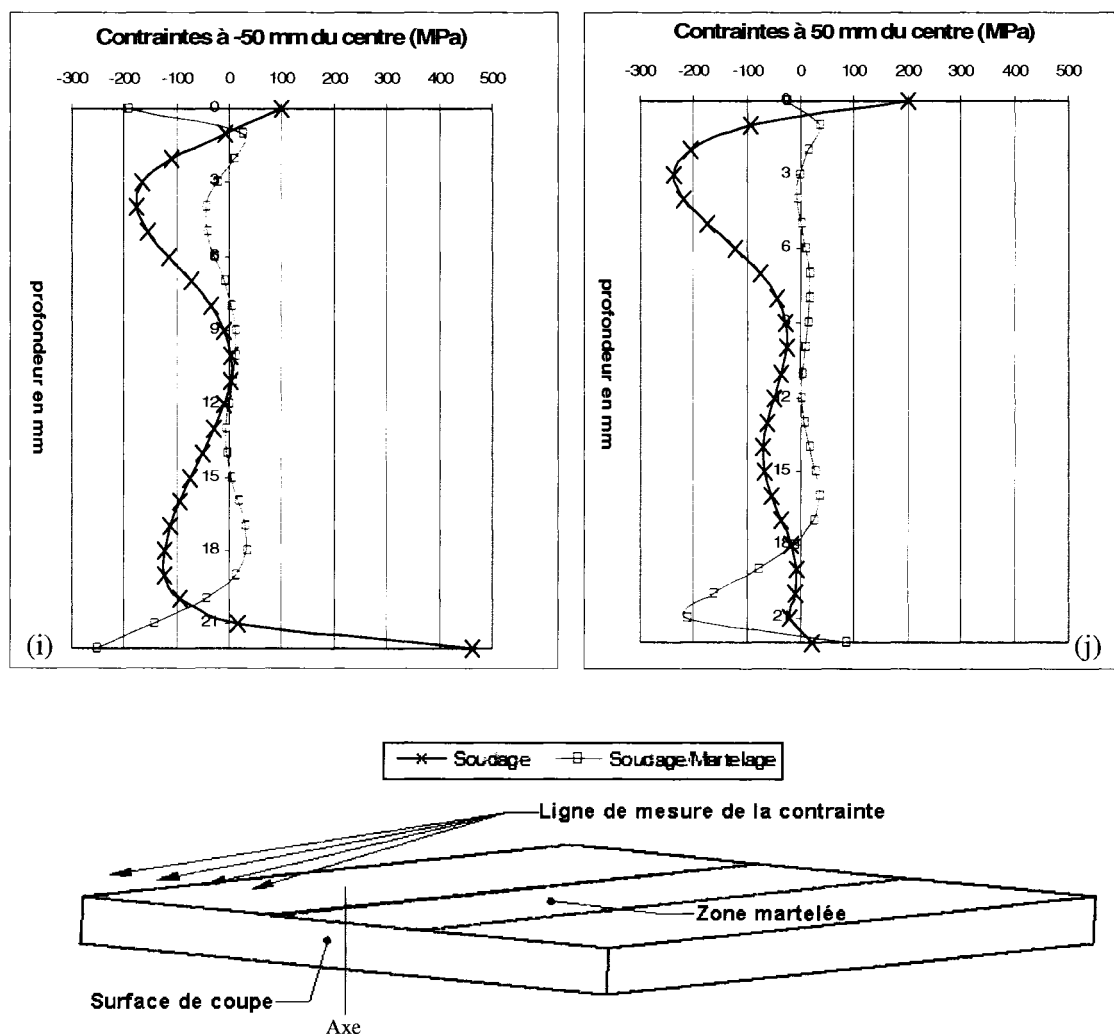


Figure 53 Valeurs de la contrainte résiduelle à travers la profondeur de la pièce avant et après martelage en différentes positions.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer, L'effet du martelage sur les valeurs des contraintes en profondeur est toujours visible. D'ailleurs les figures ci-dessous font apparaître clairement cette constatation où on peut observer que même en dehors de la zone martelée, nous retrouvons toujours de la compression.

L'étendue de la zone de compression est d'autant plus importante que l'est la zone de déformation plastique induite lors du martelage. La géométrie de la plaque joue également

un rôle important qui doit être pris en considération. Par exemple, l'étendue de cette zone augmenterait avec l'épaisseur de la plaque (DeWald et al [11]).

Les graphiques de la figure 53 mettent clairement en évidence l'influence du martelage sur la redistribution des contraintes résiduelles dues au soudage. En effet, cette réduction des contraintes est fortement visible même en dehors de la zone traitée à cause des déformations plastiques importantes induites par le procédé ; ce qui est l'effet escompté du martelage. Cette diminution des contraintes résiduelles causées par le soudage nous permet donc de prévoir que le martelage prolongerait la vie en fatigue des assemblages soudés.

Cependant, il est constaté un effet non symétrique du soudage sur la distribution des contraintes résiduelles qui peut être causé par l'état initial des contraintes internes avant le soudage. En effet, le soudage est effectué sur des plaques tel que reçues avec leur historique de fabrication. Il est possible qu'il existe des contraintes résiduelles inhérentes à cet historique ce qui peut expliquer la dissymétrie des contraintes résiduelles observées. Il serait donc souhaitable que les plaques subissent un traitement thermique (recuit de détente) pour éliminer les contraintes thermomécaniques afin de s'assurer qu'elles soient libres de toute contrainte résiduelle avant soudage.

Après martelage, des distributions de contraintes dissymétriques sont observées également à mesure que l'on s'éloigne de la zone centrale, ce qui est dû à l'effet combiné du soudage et du martelage. En effet, d'une part la non symétrie des contraintes dues au soudage à une influence sur celles mesurées après martelage, et d'autre part, le martelage peut également induire une dissymétrie du fait que lors du martelage suivant la largeur de la plaque, le pas transversal du martelage est inférieur à la largeur de l'empreinte du marteau (voir figure 48). Chaque ligne d'empreintes se superpose à la ligne d'empreintes suivante en fonction du pas transversal de martelage, exceptée pour la ligne finale. Ceci amène nécessairement une dissymétrie par rapport au cordon de soudure martelé. Cependant, il est clair qu'indépendamment de cette dissymétrie, l'effet du renversement des contraintes se fait sentir même au-delà de la zone martelée.

Cette étude ne représente qu'un aperçu de ce mode de traitement de surface pour des paramètres typique de martelage. Cependant, pour être en mesure de le caractériser, une étude plus approfondie serait nécessaire. Celle-ci devrait être plus facile à réaliser étant donné que la méthode de calcul des contraintes par micro-profil de surface de coupe est actuellement bien maîtrisée.

CONCLUSION

La première partie de ce mémoire met en évidence la nécessité de développer une méthode de mesure permettant d'évaluer les contraintes résiduelles sur la totalité d'une surface : la mesure de micro profil de surface. En effet, les mesures ponctuelles généralement employées sont de toute évidence non satisfaisantes pour étudier dans son ensemble l'influence d'un procédé de fabrication.

La méthode du micro-profil d'une surface de coupe s'avère très prometteuse comme méthode de mesure des contraintes résiduelles. Elle est basée sur la relaxation des contraintes suite au procédé de coupe à l'EDM. Les déplacements mesurés par laser sur la surface coupée sont traités et approximés par une surface polynomiale qui est utilisée pour imposer les déplacements mesurés aux nœuds d'un modèle par éléments finis. La solution de ce problème donne les contraintes normales au plan à l'origine de ces micro-déplacements. L'aboutissement final est le champ de contraintes sur la surface de coupe. L'utilisation de cette méthode est assez simple et accessible. Elle se fait dans un temps relativement court suivant la coupe.

Afin de bien illustrer cette méthode, le second volet de ce mémoire décrit la procédure de mise en œuvre de la méthode de micro-profil à l'aide d'échantillons soudés et soudés puis martelés. Plus encore, ce second volet a permis de valider la méthode en confrontant les valeurs des contraintes obtenues à celles mesurées par d'autres méthodes usuelles, telles que les mesures de jauges, la méthode du trou incrémental et la diffraction par rayons X. Ceci a permis de démontrer la fiabilité et la versatilité de cette méthode. En effet, les résultats obtenus par les différentes méthodes concordent assez bien, par exemple, sur la seconde plaque, on observe une différence de 9 MPa entre la valeur obtenue par micro-profil et celle obtenue par RS200 au centre de la plaque. La faible différence entre les valeurs obtenues selon ces diverses techniques de mesure est attribuable aux incertitudes associées à chacune de ces méthodes.

L'échantillon soudé et martelé a été choisi pour répondre à deux questions essentielles. La première est de savoir si en présence de contraintes résiduelles importantes de compression la coupe par électroérosion peut se faire sans altérer les microdéformations lors du passage du fil de coupe, ce qui éventuellement altérerait la mesure. La seconde question, plus importante encore, est d'étudier l'effet en profondeur du martelage sur la redistribution des contraintes dues au soudage. Nous avons pu constater que le martelage, contrairement aux autres procédés de traitement de surface qui ont une pénétration très faible, a une influence beaucoup plus grande suivant l'épaisseur de la plaque utilisée pour l'expérimentation et cela reste valable même loin de la zone martelée.

L'intérêt escompté du martelage est d'inverser ou d'atténuer les contraintes résiduelles de tension qui sont néfastes pour la vie en fatigue. Cependant, pour enlever ces contraintes ou les atténuer, les industries ont recours aux traitements thermiques dans des fours alors que cela n'est pas toujours possible quand les dimensions de la pièce sont importantes ou si l'opération de soudage se fait sur site. De ce fait, le martelage, qui est effectué par un équipement transportable, serait l'option idéale pour le traitement de surface dans plusieurs cas.

La conclusion la plus importante de cette étude est la démonstration que la technique de mesure des contraintes résiduelles par micro-profil peut fournir davantage de données fiables servant de comparaison entre les différents procédés de fabrication. En effet, les méthodes de mesure XRD ou RS200 ne donnent que des valeurs ponctuelles en surface. La seule technique capable de mesurer des contraintes en profondeur est la diffraction des neutrons. Toutefois, cette technique est coûteuse, complexe, souvent influencée par la microstructure, dont la taille des grains, et difficile à mettre en œuvre, particulièrement lorsque le matériau comporte plusieurs phases comme c'est généralement le cas dans les soudures. En contrepartie la méthode de micro-profil ne dépend que des propriétés élastiques du matériau.

RECOMMANDATIONS

Le comportement des assemblages soudés, à cause des contraintes internes résultant de l'opération de soudage et/ou d'un traitement de surface, est un sujet d'étude qui est encore en développement.

Une exploration plus approfondie de certains procédés de fabrication, qui génèrent des contraintes résiduelles, serait souhaitable pour fin d'optimisation. Elle consisterait à utiliser les contraintes résiduelles, mesurées par la méthode de micro-profil d'une surface de coupe, pour augmenter la compréhension et pour mieux prédire l'effet mécanique de ces procédés.

Cette étude pourrait être poursuivie selon les axes suivants :

- Établir une méthodologie de tests du soudage et du martelage qui utiliserait des échantillons ayant subi des traitements thermiques les libérant de toutes contraintes résiduelles avant soudage ;
- Adapter la méthode à des géométries autres que rectangulaires ;
- Optimiser les paramètres de soudage afin de minimiser les contraintes dans les assemblages soudés ;
- Analyser les divers paramètres de martelage tels le nombre de passes nécessaires pour atteindre les contraintes de compression désirées ;
- Définir la séquence optimale du martelage lors du soudage multi-passes ;
- Évaluer l'effet des traitements thermomécaniques sur les contraintes résiduelles ;
- Évaluer les contraintes en bout de fissure dans les éprouvettes servant aux mesures de vitesse de fissuration.

ANNEXE I

SOURCE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES RELATIVES AU SOUDAGE

L'énergie mise à contribution pour la fusion du métal et le cycle thermique qui s'ensuit (avec une solidification rapide) viennent modifier la microstructure du matériau dans la région du cordon de soudure. Cette région environnant la soudure et englobant la zone du métal de base, dont la microstructure a été influencée par la soudure, peut, dans les aciers, être divisée en plusieurs zones. Ces zones, qui se trouvent entre le métal de base (où la température ne dépasse pas 600°C) et le métal d'apport (lieu de fusion puis de re-solidification du métal) peuvent être définies comme suit :

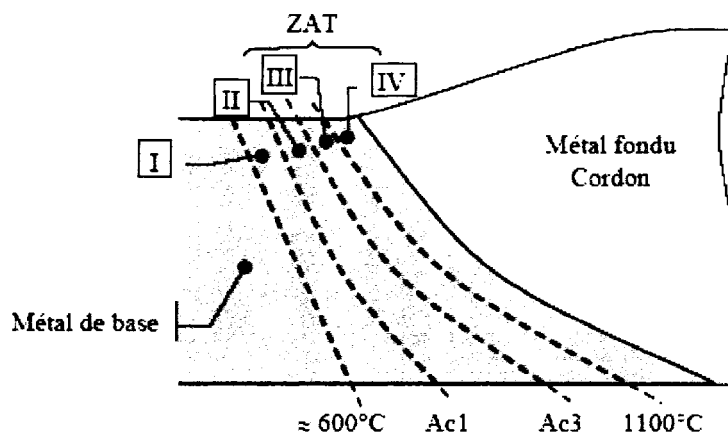


Figure 54 *Zone affectée thermiquement d'un cordon de soudure.*

Zone I : Zone où la température est comprise entre 600°C et Ac1 ; il peut y avoir précipitation, revenu ou globularisation, suivant l'état initial de l'acier. Ac1 serait ici la température de début de la transformation austénitique, soit autour de 720°C pour les aciers au carbone (ferritiques).

Zone II : Zone où la température est comprise entre Ac1 et Ac3 (Ac3 serait ici la température de fin de transformation austénitique) les modifications y sont importantes. L'austénitisation partielle peut conduire à un affinement de la taille du grain au refroidissement. Ceci correspondrait au début de la zone affectée thermiquement (ZAT).

Zone III : Zone où la température est comprise entre A_{c3} et 1100°C . Après refroidissement, on obtient des microstructures normalisées ou plus grossières selon la température maximale atteinte.

Zone IV : Zone où la température est comprise entre 1100°C et la température de fusion. Le grossissement du grain austénitique est tel que la trempabilité du métal est considérablement augmentée et les microstructures obtenues dans cette zone après refroidissement varient de microstructures ferrito-perlitiques aciculaires très grossières, pour des refroidissements modérément rapides, à microstructures bainitiques ou martensitiques, pour les vitesses de refroidissement les plus élevées.

Ainsi, dans la ZAT, les gradients thermiques élevés introduits par le procédé de soudage engendrent des contraintes résultant des changements volumétriques et de la plasticité. En effet, soumis à une forte élévation de la température, le matériau subit des transformations de phases à l'état solide, ce qui occasionne une incompatibilité des déformations à une échelle localisée ainsi que de forts gradients de contraintes, notamment à cause des différences de propriétés physiques des diverses phases ou constituants métallurgiques. Mentionnons aussi que la déformation plastique survient préférentiellement dans la zone la plus chaude de la soudure, ce qui donne lieu à des contraintes résiduelles importantes lors du refroidissement.

Les transformations de phase qui s'opèrent avec une grande variation volumétrique, i.e. celles pour lesquelles les phases « fille » et « mère » ont des réseaux cristallins traduisant un grand écart de leur paramètre de maille ont de plus lourdes conséquences sur le plan thermomécanique. De plus, ces phases ont des coefficients d'expansion thermique différents, ce qui augmente davantage les contraintes thermomécaniques. De façon générale, le caractère multi-phasé de la région soudée se traduit par des différences importantes au chapitre des autres propriétés thermomécaniques tels le module d'élasticité, la capacité thermique et la limite d'élasticité.

ANNEXE II

APPROXIMATION D'UN PROFIL PAR LA METHODE DES MOINDRES CARRÉES

Ce programme lit un fichier texte contenant les lectures d'un profilometre et écrit un fichier texte « coeftp.txt » contenant les coefficients du polynôme d'approximation après nivelage, filtrage et lissage.

* **PROGRAMME PRINCIPAL** *

* **DECLARATION DES VARIABLES**

```
REAL*8 X(82000),Y(82000),Z(82000) !,B(28),A(28,28),T(28)
REAL*8 LONGUEUR,LARGEUR, PAS, VALEUR(1000,1000),
1 ZV(1000,1000),VALNIV(1000,1000)
REAL*8 PA(3),PB(3),PC(3),VAB(3),VAC(3),VN(3),VNU(3),PM(3)
REAL*8 XX,YY,Q,R,PCNIV,PMNIV
REAL(8), ALLOCATABLE :: A(:, :)
REAL(8), ALLOCATABLE :: T(:)
REAL(8), ALLOCATABLE :: B(:)
```

```
INTEGER INOEUD,NBT,DP,NBEQ
CHARACTER*20 NOMFICHIER
REAL*8 LX,LY,LZ,NPX,NPY,NPZ,PX,PY,PZ
REAL*8 CP(300000,3)
INTEGER CE(300000,8)
```

* **TOUTES LES AUTRES VARIABLES SONT IMPLICITEMENT ENTIERES**

* **LONGUEUR:** LONGUEUR DE LA PLAQUE

* **LARGEUR:** LARGEUR DE LA PLAQUE

* **PAS:** PAS DE LECTURE DU PROFILOMETRE

* **PASS:** PAS D'ECRITURE DES POINTS LISSÉS

* **A :** MATRICE DES COEFFICIENTS DES COORDONNÉES X, Y

* **T :** VECTEUR COLONNE DES COEFFICIENTS DES COORDONNÉES X, Y ET DU PROFIL Z.

* **B :** VECTEUR COLONNE DES COEFFICIENTS B INCONNUS DE LA RÉGRESSION

* **X, Y :** COORDONNÉES X ET Y DES POINTS DE LECTURE DANS LE PLAN X0Y

* **Z :** VALEURS DU PROFILOMETRE EN MICRONS

* **VALEUR :** VALEURS Z DU PROFILOMETRE

***** FIN DE LA DECLARATION DES VARIABLES*****

* **LECTURE DES DONNEES**

* **DEFINITION DU TYPE DE LECTURE DU PROFILOMETRE**

```
WRITE(6,*) 'QUELLE EST LA LONGUEUR DE LA PLAQUE EN MM?'
```

```
READ (5,*) LONGUEUR
```

```
WRITE(6,*)
```

```
WRITE(6,*) 'QUELLE EST LA LARGEUR DE LA PLAQUE EN MM?'
READ (5,*) LARGEUR
WRITE(6,*)
```

```
WRITE(6,*) 'QUEL EST LE PAS DE LECTURE '
READ (5,*) PAS
WRITE(6,*)
```

```
WRITE(6,*) 'QUEL EST LE NOM DU FICHIER DU PROFILO FICHIER.PR '
READ (5,*) NOMFICHIER
WRITE(6,*)
OPEN(3,FILE=NOMFICHIER)
```

```
DP=7 !DEGRÉ DU PLOLYNOME
NBEQ=((DP+1)*(DP+2))/2 ! NBRE D'ÉQUATION À SOLUTIONNER ET LE NBRE DE COEFFICIENT DU
POLYNOME
```

```
ALLOCATE (A(NBEQ,NBEQ))
ALLOCATE (T(NBEQ))
ALLOCATE (B(NBEQ))
```

```
* CALCUL DU NOMBRE D'ELEMENTS PAR LIGNE ET DU NOMBRE DE LIGNE
DU FICHIER CREE PAR LE PROFILOMETRE
```

```
NBCOLONNES = INT(LONGUEUR/PAS) + 1
NBLIGNES = INT (LARGEUR/PAS) + 1
```

```
* LÉCTURE DES UZ MESURÉES
```

```
DO J=1,NBLIGNES
```

```
    READ (3,*) (VALEUR(J,I),I=1,NBCOLONNES)
```

```
END DO
```

```
*****FIN DE LÉCTURE DES DATA*****
```

```
***** NIVELAGE *****
```

```
DO J=1,NBLIGNES
```

```
    DO I=1,NBCOLONNES
```

```
        IF (J.EQ.10.AND.I.EQ.10) THEN
```

```
            PA(1)=I*1.D0
```

```
            PA(2)=J*1.D0
```

```
            PA(3)=(4*VALEUR(J,I)+VALEUR(J+1,I)+VALEUR(J+1,I+1)+
```

```
1            VALEUR(J,I+1))/7000.0D0
```

```
        END IF
```

```
        IF (J.EQ.NBLIGNES-10.AND.I.EQ.NBCOLONNES-10) THEN
```

```

        PB(1)=I*1.D0 !+PAS
        PB(2)=J*1.D0 !+PAS
        PB(3)=(4*VALEUR(J,I)+VALEUR(J-1,I)+VALEUR(J,I-1)+
1          VALEUR(J-1,I-1))/7000.0D0
    END IF
    IF (J.EQ.NBLIGNES-10.AND.I.EQ.10) THEN
        PC(1)=I*1.D0 !+PAS
        PC(2)=J*1.D0 !+PAS
        PC(3)=(4*VALEUR(J,I)+VALEUR(J-1,I)+VALEUR(J-1,I+1)+
1          VALEUR(J,I+1))/7000.0D0
    END IF

ENDDO
ENDDO
    PM(1)=(PA(1)+PB(1)+PC(1))/3
    PM(2)=(PA(2)+PB(1)+PC(2))/3
    PM(3)=(PA(3)+PB(3)+PC(3))/3

    VAB(1)=PB(1)-PA(1)
    VAB(2)=PB(2)-PA(2)
    VAB(3)=PB(3)-PA(3)

    VAC(1)=PC(1)-PA(1)
    VAC(2)=PC(2)-PA(2)
    VAC(3)=PC(3)-PA(3)

    VN(1)=VAB(2)*VAC(3)-VAC(2)*VAB(3)
    VN(2)=VAC(1)*VAB(3)-VAB(1)*VAC(3)
    VN(3)=VAB(1)*VAC(2)-VAC(1)*VAB(2)

    VNU(1)=VN(1)/SQRT(VN(1)**2+VN(2)**2+VN(3)**2)
    VNU(2)=VN(2)/SQRT(VN(1)**2+VN(2)**2+VN(3)**2)
    VNU(3)=VN(3)/SQRT(VN(1)**2+VN(2)**2+VN(3)**2)

    PMNIV= (PM(3))*VNU(3)+(PM(1)*VNU(1))+(PM(2)*VNU(2))

    Q=1.D0
    DO I=1,NBCOLONNES
        R=1.D0
        DO J=1,NBLIGNES
            XX=Q*1.D0
            YY=R*1.D0
            VALNIV(J,I)=((VALEUR(J,I)/1000.0D0)*VNU(3)
1          +(XX*VNU(1))+(YY*VNU(2)))-PMNIV
        
```

```

      R=R+1.D0
    ENDDO
    Q=Q+1.D0
  ENDDO

```

```

WRITE(6,*) VALNIV(2,2)
WRITE(6,*) VALNIV(20,20)

```

```

*****FIN NIVELAGE*****
*****
***** FILTRAGE DES DONNEES*****

```

```

DO J=1,NBLIGNES
  DO I=1,NBCOLONNES
    IF (J.GT.1.AND.J.LT.NBLIGNES.AND.I.EQ.1) THEN
      VALNIV(J,I)=(VALNIV(J,I)+VALNIV(J+1,I)+VALNIV(J-1,I)+
1      VALNIV(J+1,I+1)+4*VALNIV(J,I+1)+VALNIV(J-1,I+1))/9
    ELSE IF (J.GT.1.AND.J.LT.NBLIGNES.AND.I.EQ.NBCOLONNES) THEN
      VALNIV(J,I)=(VALNIV(J,I)+VALNIV(J-1,I)+VALNIV(J-1,I-1)+
1      4*VALNIV(J,I-1)+VALNIV(J+1,I-1)+VALNIV(J+1,I))/9
    ELSE IF (J.EQ.NBLIGNES.AND.I.GT.1.AND.I.LT.NBCOLONNES) THEN
      VALNIV(J,I)=(VALNIV(J-1,I-1)+4*VALNIV(J-1,I)+VALNIV(J-1,I+1)+
1      VALNIV(J,I-1)+VALNIV(J,I+1)+VALNIV(J,I))/9
    ELSE IF (J.EQ.1.AND.I.GT.1.AND.I.LT.NBCOLONNES) THEN
      VALNIV(J,I)=(VALNIV(J,I-1)+VALNIV(J,I+1)+VALNIV(J+1,I-1)+
1      4*VALNIV(J+1,I)+VALNIV(J+1,I+1)+VALNIV(J,I))/9
    ELSE IF (J.EQ.1.AND.I.EQ.1) THEN
      VALNIV(J,I)=(VALNIV(J,I)+VALNIV(J,I+1)+
1      4*VALNIV(J+1,I+1)+VALNIV(J+1,I))/7
    ELSE IF (J.EQ.1.AND.I.EQ.NBCOLONNES) THEN
      VALNIV(J,I)=(VALNIV(J,I)+VALNIV(J,I-1)+VALNIV(J+1,I)+
1      4*VALNIV(J+1,I-1))/7
    ELSE IF (J.EQ.NBLIGNES.AND.I.EQ.1) THEN
      VALNIV(J,I)=(VALNIV(J,I)+VALNIV(J-1,I)+
1      4*VALNIV(J-1,I+1)+VALNIV(J,I+1))/7
    ELSE IF (J.EQ.NBLIGNES.AND.I.EQ.NBCOLONNES) THEN
      VALNIV(J,I)=(VALNIV(J,I)+VALNIV(J,I-1)+VALNIV(J-1,I)+
1      4*VALNIV(J-1,I-1))/7
    END IF
  END DO
END DO
END DO

DO I=2,NBCOLONNES-1
  DO J=2,NBLIGNES-1

```

```

                VALNIV(J,I)=(VALNIV(J-1,I)+VALNIV(J,I-1)+VALNIV(J+1,I)+
1            VALNIV(J,I+1)+VALNIV(J-1,I-1)+VALNIV(J+1,I+1)+VALNIV(J-1,I+1)+
2            VALNIV(J+1,I-1)+VALNIV(J,I))/9

```

```

            END DO

```

```

        END DO

```

```

***** FIN FILTRAGE DES DONNÉES *****

```

```

***** DEBUT DU LISSAGE *****

```

```

        K=1
        R=1*1.D0
        Q=1*1.D0
        PAS=PAS*1.D0
        NBT=0
        DO J=5,NBLIGNES-5
            Q=1*1.D0
            DO I=5,NBCOLONNES-5
                NBT=NBT+1
                Z(K)=VALNIV(J,I)
                X(K)=Q
                Y(K)=R
                K=K+1
                Q=Q+PAS
            END DO
            R=R+PAS
        END DO

```

```

        K=0
        DO II=0,DP
            DO JJ=0,II
                K=K+1
                M=0
                DO I=0,DP
                    DO J=0,I
                        M=M+1
                        A(K,M)=0.
                        DO N=1,NBT !NBLIGNES*NBCOLONNES
                            A(K,M)=A(K,M)+((X(N)**(I-J))*(Y(N)**J)
1                        *(X(N)**(II-JJ))*(Y(N)**JJ))
                                !(S*B=T)0U A*B=T
                        END DO
                    END DO
                END DO

```

```

                T(K)=0.D0

```

```

            END DO

```



```

      END DO

      CALL SOLVR2(M,A,T,B)
      OPEN(51,FILE='COEFPOL.TXT')
      WRITE(51,110) 1,(N,N=1,M)
      WRITE (51,120) 1,(B(I), I=1,M)
      WRITE(51,*) NOMFICHIER

      *****
      103 FORMAT(<NBCOLONNES>E12.3)
      110 FORMAT(1I20,<M>I20)
      120 FORMAT(1I20,<M+1>E20.5)

      WRITE(6,*) 'L"ECRITURE DU FICHIER EST TERMINE'
      END
      !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
      !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
      SUBROUTINE SOLVR2 (N,C,F,SIGMAH)

      REAL*8 C(N,N), F(N), L(N,N), SOMME, Y(N), SIGMAH(N) ,U(N,N)
C
      DO 9 I = 1,N
      DO 9 J = 1,N
          U(I,J) = 0.D0
          L(I,J) = 0.D0
      9 CONTINUE
C
      DO 10 I = 1,N
          Y(I) = 0.D0
          SIGMAH(I) = 0.D0
      10 CONTINUE
C
      U(1,1) = C(1,1)
      L(1,1) = 1.D0
      L(2,1) = C(2,1)/U(1,1)
      U(1,2) = C(1,2)
      L(2,2) = 1.D0
      U(2,2) = C(2,2) - L(2,1)*U(1,2)
C
      DO 1 J = 3,N
          L(J,1) = C(J,1)/U(1,1)
          U(1,J) = C(1,J)
C
      DO 2 I = 2,J-1
          SOMME = 0.D0

```

```

DO 3 M = 1,I-1
    SOMME = SOMME + L(J,M)*U(M,I)
3    CONTINUE
C
    IF (DABS(C(J,I)-SOMME) .LT. 1.D-50 .OR.
1      DABS(U(I,I)) .LT. 1.D-50 .OR.
2      DABS(U(I,I)) .GT. 1.D+50) THEN
WRITE(6,*) I,J,C(J,I),SOMME,U(I,I)
    stop
    L(J,I) = 0.D0
    ELSE
    L(J,I) = (C(J,I) - SOMME)/U(I,I)
    END IF
    U(I,J) = L(J,I)*U(I,I)
2    CONTINUE
C
    L(J,J) = 1.D0
    SOMME = 0.D0
    DO 4 M = 1,J-1
        SOMME = SOMME + L(J,M)*U(M,J)
4    CONTINUE
C
    U(J,J) = C(J,J) - SOMME
1 CONTINUE
C
    Y(1) = F(1)
    DO 5 I = 2,N
        SOMME = 0.D0
        DO 6 J = 1,I-1
            SOMME = SOMME + L(I,J)*Y(J)
6        CONTINUE

        Y(I) = F(I) - SOMME
5 CONTINUE
C
    IF (DABS(Y(N)) .LT. 1.D-50 .OR.
1      DABS(Y(N)) .GT. 1.D+50 .OR.
2      DABS(U(N,N)) .LT. 1.D-50 .OR.
3      DABS(U(N,N)) .GT. 1.D+50 ) THEN
        SIGMAH(N)=0.D0
        write(6,*)'sigmah'
        stop
    ELSE
        SIGMAH(N) = Y(N)/U(N,N)
    END IF

```

```

DO 7 I = N-1,1,-1
  SOMME = 0.D0
  DO 8 J = I+1,N
    IF (DABS(U(I,J)) .LT. 1.D-50 .OR.
1      DABS(U(I,J)) .GT. 1.D+50 .OR.
2      DABS(SIGMAH(J)) .LT. 1.D-50 .OR.
3      DABS(SIGMAH(J)) .GT. 1.D+50 ) THEN
      write(6,*) 'continue'
      stop
      GO TO 8
    ELSE
      SOMME = SOMME + U(I,J)*SIGMAH(J)
    END IF
8  CONTINUE
  IF (DABS(Y(I)-SOMME) .LT. 1.D-50 .OR.
1    DABS(U(I,I)) .LT. 1.D-50 ) THEN
    SIGMAH(I)=0.D0
    write(6,*) 'encore sigmah'
    stop
  ELSE
    SIGMAH(I) = (Y(I) - SOMME) / U(I,I)
  END IF
7 CONTINUE
C
  RETURN
  END

!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!FIN SOLVEUR!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

ANNEXE III

PROGRAMME DE RÉOLUTION PAR MEF SUR ANSYS

Ce programme permet de construire la géométrie du modèle par éléments finis et l'imposition des déplacements interpolés aux nœuds du modèle.

```

FINISH
/CLEAR
/PREP7
H=100
L=125
B=22
PAS=1
C=0
TM=36 !TAILLE DE LA MATRICE
*DIM,DON,TABLE,1,TM,1,,
*TREAD,DON,'COEFPOL','TXT',' ',,

ET,1,SOLID45 !95
MP,EX,1,210000
MP,NUXY,1,,.3
BLC4,PAS,PAS,L,B,H

LESIZE, 5, , , L/1,
LESIZE, 7, , , L/1,
LESIZE, 6, , , B/1,
LESIZE, 8, , , B/1,
LSEL,S,LINE,,9,12
LESIZE, ALL,5, , ,.1, , , ,1
LSEL,ALL
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,9
FITEM,5,12
CM,_Y1,LINE
LSEL, , , ,P51X
*GET,_Z1,LINE,,COUNT
*SET,_Z2,0

```

```

*DO,_Z5,1,_Z1
*SET,_Z2,LSNEXT(_Z2)
*GET,_Z3,LINE,_Z2,ATTR,NDNX
*GET,_Z4,LINE,_Z2,ATTR,SPNX
*GET,_Z6,LINE,_Z2,ATTR,KYND
*IF,_Z3,GT,0,THEN
*IF,_Z4,NE,0,THEN
LESIZE,_Z2,,,_Z3,1/_Z4,,,_Z6
*ENDIF
*ENDIF
*ENDDO
ALLSEL,ALL
VMESH,1
NSEL,ALL
NPLLOT
NSEL,S,LOC,Z,H
*GET,NBN DH,NODE,,COUNT
NSEL,ALL
*GET,NBND,NODE,,COUNT
*DIM,VAZ,ARRAY,TM+1!VZ=0
*DO, I, 1, NBND, 1
  *IF,NZ(I),EQ,H,THEN
    C=C+1
    NSEL,S,NODE,,I
    M=0
    *DO,V,0,7,1
      *DO,W,0,V,1
        M=M+1
        VAZ(M+1)=VAZ(M)+DON(1,M)*((NX(I)*1E-3)**(V-W))*((NY(I)*1E-3)**W)
        VAZ(M)=0
      *ENDDO
    *ENDDO
  *ENDDO
D,I,UZ,-VAZ(M+1)

```

```
*ENDIF
*ENDDO

NSEL,S,LOC,X,PAS
NSEL,R,LOC,Y,PAS
NSEL,R,LOC,Z,H
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,PAS
NSEL,R,LOC,Y,B+PAS
NSEL,R,LOC,Z,H
D,ALL,UX,0
NSEL,ALL
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
EPLLOT
/DSCALE,ALL,OFF
PLNSOL,S,Z
```

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Carr, D.G. Ripley, M.I.; Holden, T.M.; Brown, D.W.; Vogel, S.C., *Residual stress measurements in Zircaloy-4 weld by neutron diffraction*. Acta Materialia, v 52, n 14, Aug 16, 2004, 4083-4091
- [2] Y. Arai, M. Kikuchi, T. Watanabe and M. Nakagaki. *Residual stress due to welding and its effect on the assessment of cracks near the weld interface*. Int J Pres Ves and Piping. 63 (1995), 237-248
- [3] S. Murugan, Sanjai K. Rai, P. V. Kumar, T. Jayakumar, Baldev Raj, M. S. C. Bose. *Temperature distribution and residual stresses due to multi pass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads*. International Journal of Pressure Vessels and Piping 78 (2001), 307-317
- [4] Ueda, Y., K. Fukuda, et al. *A new measuring method of residual stresses with the aid of finite element method and reliability of estimated values*. Transactions of the JWRI 4(2): (1975), 123-131.
- [5] Hill, M. R. and D. V. Nelson. *The inherent strain method for residual stress determination and its application to a long welded joint*. PVP v. 318. New York, NY, ASME. (1995), 343-352.
- [6] Timoshenko, S.P. and J.N. Goodier. (1970). *Theory of Elasticity*. (3e ed.). New York: McGraw-Hill.
- [7] Prime, M.B. (Eng. Sci. and Applications Div., Los Alamos National Laboratory). *Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut*. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, v 123, n 2, April, 2001, 162-168
- [8] Prime, M.B. (Eng. Sciences/Applications Division, Los Alamos National Laboratory); Sebring, R.J.; Edwards, J.M.; Hughes, D.J.; Webster, P.J. *Laser surface-contouring and spline data-smoothing for residual stress measurement*. Experimental Mechanics, v 44, n 2, April, 2004, 176-184
- [9] BUECKNER, H.F. (1958). *The Propagation of Cracks and the Energy of Elastic Deformation*, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 80, 1225-1230
- [10] Zhang, Y.; Ganguly, S.; Edwards, L.; Fitzpatrick, M.E. *Residual stress mapping using the contour method*. Acta Materialia, v 52, n 17, Oct 4, 2004, 5225-5232
- [11] DeWald, Adrian T.; Rankin, Jon E.; Hill, Michael R.; Lee, Matthew J.; Chen, Hao-Lin. *Assessment of tensile residual stress mitigation in Alloy 22 welds due to laser peening*. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, v 126, n 4, October, 2004, 465-473

- [12] M. Meo, R. Vignjevic. *Finite element analysis of residual stress induced by shot peening process*. Advances in Engineering Software 34 (2003), 569–575
- [13] P J. withers and h. k. d. h. bhadeshia. *Residual stress. Part1. Measurement techniques*. Materials Science and Technology. 2001, 17, 355 – 365.
- [14] P J. withers and h. k. d. h. bhadeshia. *Residual stress. Part 2. Measurement techniques*. Materials Science and Technology. 2001, 17, 365 – 375.
- [15] C. Veiga. A. Loureiro. J. Pina. A. Castanhola Batista. *Residual Stress Distribution in Butt Weld Joint-Effect of the weld Groove Shape*. Material Science Forum Vols. 404-407 (2002), 387-392
- [16] VISHAY MEASUREMENTS GROUP (1993). « *Measurement of Residual stresses by the Hole-Drilling Strain Gauge methode*. TN-503-5, 18p
- [17] ASTM (1999). « *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method* », E 837-99, 10 p.
- [18] Flaman, M. T., and Manning, B. H., 1985, *Determination of Residual Stress Variation with Depth by the Hole Drilling Method*, Exp. Mech., 25, No.6, 205–207
- [19] Wern, H., 1995, “*Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole-drilling Method, A New Integral Formalism*,” Strain, 31, No. 2, 63–68.
- [20] Krawitz, A. D., andWinholtz, R. A., 1994. *Use of Position-Dependent Stressfree Standards for Diffraction Stress Measurements*. Mater. Sci. Eng., A, 185, 123–130
- [21] Lobanov, L.M. Garf, E.F. *Estimation of life of metal tubular structure connections at ultrasonic peening treatment of welded joint zone*. Journal of Constructional Steel Research, v 46, n 1-3, Apr-Jun, 1998, p 431-432